



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SEDE BOGOTÁ

Desarrollo de un modelo para determinación de abrasividad de suelos con características vérticas

Hugo Alberto González Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales
Medellín, Colombia
2012

Desarrollo de un modelo para determinación de abrasividad de suelos con características vérticas

Hugo Alberto González Sánchez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ingeniería

Director:

Ph.D. Alejandro Toro

Codirector:

M.Sc. Daniel Jaramillo J.

Línea de Investigación:

Desgaste por partículas duras – Variabilidad de suelos

Grupo de Investigación:

Grupo de Tribología y Superficies

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales

Medellín, Colombia

2012

Desarrollo de un modelo para determinación de abrasividad de suelos con características vérticas.

*A Olga Lucía, Laura del Sol y Pablo,
A mi familia,
Al Creador.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agropecuarias – Departamento de Ingeniería Agrícola, que me suministraron el tiempo e instalaciones para realizar la tesis doctoral.

Al Profesor Alejandro Toro por su apoyo incondicional y orientación permanente.

Al Profesor Daniel Jaramillo (Codirector) por su apoyo incondicional y orientación.

Al Profesor Fernando Álvarez por su valiosa asesoría.

A todos los integrantes del grupo Arados (María Luisa Anaya, Carlos Restrepo, Pablo Agudelo, Milton Alvarado, Esteban Sepúlveda, Alejandro Toro, Daniel Jaramillo y Fernando Álvarez), por la colaboración y acompañamiento durante toda la investigación.

Al Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) - Universidad Estadual de Campinas (Brasil), por las sugerencias y colaboración durante la pasantía.

A todos los integrantes del Grupo de tribología y superficies (GTS) de la Universidad Nacional de Colombia, por las observaciones realizadas durante los seminarios.

Al profesor Germán García, por los comentarios, sugerencias y acompañamiento.

Al Laboratorio de Maquinaria Agrícola, representado por los Profesores: Iván Aristizabal, Edilson Moreno y Elkin Cortés. Técnicos: Alexander Larrea y Alirio Castrillón. Por la valiosa colaboración y sugerencias.

Al DIME, por financiar los proyectos de investigación: “Desarrollo de herramientas de arado tipo cincel para labranza de suelos de textura pesada de clima cálido seco (Santafé de Antioquia)” y “Diseño, construcción y evaluación de un tribómetro para estudiar el desgaste de herramientas agrícolas bajo condiciones controladas”

Al Centro Agropecuario Cotové, por la asignación de un lote, equipos y personal para poder realizar los experimentos de campo.

A Industrias HRV representada por el Wilmer Pérez, que realizaron el maquinado de las herramientas de cincel.

A la empresa Agroindustrial Apolo representada por cesar Jiménez, por suministrar información técnica del arado de cincel rígido.

Resumen

Se desarrolló un modelo para estimar la capacidad abrasiva de suelos con características vérticas (Cotové - Santa Fé de Antioquia) durante el proceso de labranza en función de sus propiedades físicas, mecánicas y estructurales, y de las condiciones de operación de herramientas de arado cincel. Las propiedades del suelo presentaron en general una variabilidad relativamente alta. Utilizando componentes principales se demostró la presencia de dos tipos de suelos: franco arcilloso y franco limoso. Variables consideradas: densidad aparente (D_a); humedad gravimétrica (W); contenido de materia orgánica (MO); fragmentos de roca (FR); tierra fina (T); morfología (M) y dureza de partículas (Ha); potencia (P) y velocidad de trabajo; dos tipos de suelos; y pérdida de peso de la herramienta (Y_h). El índice de abrasividad (I_a) se determinó con base en imágenes de herramientas desgastadas, comparación entre tratamientos, análisis dimensional y regresiones multivariadas. I_a presentó alta correlación con tasas de desgaste, donde las variables FR/T y M en general tuvieron el mayor peso. Se observó presencia de desgaste severo en los vértices inferiores de herramientas, con redondeo y deformación plástica.

Palabras clave: Tribología, herramientas agrícolas de arado de cincel, variabilidad espacial de suelos, índice de abrasividad de suelos, desgaste abrasivo.

Abstract

A model was developed to estimate the abrasive capacity of soils with vertic characteristics (Cotové - Santa Fe de Antioquia) during the tillage process according to their physical, mechanical and structural properties, and operational conditions chisel plow tools. Soil properties presented in general a relatively high variability. Using principal components showed presence of two types of soils: clay loam and silt loam. Variables considered: bulk density (D_a); gravimetric moisture (W); content of organic matter (MO); rock fragments (RF); fine earth (T); morphology (M) and particle hardness (Ha); power (P) and working speed; two types of soils; and weight loss of the tool (Y_h). The abrasive index (I_a) was determined based on images of worn tools, comparison between treatments, dimensional analysis and multivariate regressions. I_a showed high correlation with wear rates, where the variables FR/T and M in general had the most weight. The presence of severe wear was observed on the bottom corners of tools, with rounding and plastic deformation.

Keywords: Tribology, agricultural chisel plow, spatial variability of soils, soil abrasion index, abrasive wear.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	VII
Contenido	VIII
Lista de figuras	IIIX
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
1. Marco teórico	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Conceptos básicos sobre mecanismos de desgaste	6
1.2.1 La abrasión.....	7
1.2.2 Mecanismos de desgaste abrasivo.....	8
1.2.3 Variables que afectan el desgaste abrasivo.....	8
1.3 Arados de cinceles (escarificadores)	11
1.4 Desgaste de herramientas agrícolas	12
1.5 Propiedades físicas y mecánicas de los suelos que afectan el desgaste de herramientas agrícolas.	15
1.6 Granulometría del suelo	19
1.7 Morfología de las partículas.....	20
1.8 Dureza de las partículas de suelo	24
1.9 Materia orgánica (MO).....	26
1.10 Factores dinámicos en la tracción de herramientas agrícolas.....	26
1.11 Ecuaciones dimensionales y teorema PI (Murphy, 1950)	28
2. Materiales y métodos.....	31
2.1 Descripción del sitio experimental	31
2.2 Preparación del lote experimental, muestreo y propiedades del suelo evaluadas	32
2.2.1 Análisis granulométrico del suelo	33
2.2.2 Morfología de partículas gruesas del suelo.....	33
2.2.3 Dureza de las partículas	35
2.3 Análisis de variabilidad espacial de propiedades del suelo.....	35
2.3.1 Análisis exploratorios.....	36
2.3.2 Análisis de tendencia espacial.....	36
2.3.3 Análisis de semivariografía	36
2.4 Experimentos de campo.....	37
2.5 Análisis de los mecanismos de desgaste	43

2.6 Construcción del modelo de abrasividad de suelos	43
2.6.1 Análisis de tendencia espacial.....	43
2.6.2 Metodología empleada para determinar cada parámetro de abrasividad.....	44
2.6.3 Análisis dimensional y análisis de regresión lineal multivariado	45
2.6.4 Secuencia seguida para el desarrollo de la ecuación dimensional.....	46
3. Resultados y discusión.....	49
3.1 Análisis de propiedades del suelo	49
3.2 Análisis de experimentos de resistencia al desgaste de las herramientas de arado de cincel durante la labranza.....	63
3.2.1 Comparaciones entre los tratamientos Eij.....	76
3.2.2 Influencia de las propiedades del suelo sobre el desgaste de la herramienta.....	79
3.2.3 Análisis de influencia de las variables en cada tratamiento y comparaciones entre tratamientos	85
3.3 Cálculo de la abrasividad del suelo	90
3.3.1 Modelos adimensionales de abrasividad de suelos agrícolas	90
3.3.2 Modelos de desgaste utilizando regresiones multivariadas.....	94
3.3.3 Índice de abrasividad (I_a).	97
3.4 Discusión general.....	102
4. Conclusiones y recomendaciones.....	105
4.1 Conclusiones.....	105
4.2 Recomendaciones.....	1065
A. Anexo: lenguaje utilizado para el desarrollo del programa angulosidad.....	111
B. Anexo: procedimiento para determinar datos con base en mapas kriging.	111
C. Anexo: método de Gauss aplicado a la solución de la ecuación dimensional de abrasividad de suelos agrícolas.....	115
D. Anexo: mediciones iniciales de las variables de abrasividad en el lote experimental de Cotové (Abril, 2008).....	117
E. Anexo: resultados de las variables de abrasividad en las coordenadas de las líneas experimentales.	119
F. Anexo: propiedades del suelo no incluidas en el modelo de abrasividad de suelos agrícolas (medidas en el lote experimental).....	143
G. Anexo: Granulometría en porcentaje del suelo del lote experimental de Cotové (abril 2008).	149
H. Anexo: dureza superficial de las herramientas en escala Rockwell B.	151
I. Anexo: justificación sobre el uso de platinas durante los experimentos de campo	153

J. Anexo: artículo sobre variabilidad espacial de propiedades físico – mecánicas de suelos, desarrollado durante la ejecución de la tesis.....	155
Bibliografía	167

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Descripción esquemática de los cuatro principales mecanismos de desgaste (Zum Gahr, 1987).....	6
Figura 1-2: Desgaste a dos y tres cuerpos (Zum Gahr, 1987).....	7
Figura 1-3: Resistencia al desgaste abrasivo (abrasión a dos cuerpos) de diferentes materiales medidos en ensayos a abrasión, variando la dureza de los materiales (Zum Gahr, 1998).....	9
Figura 1-4: Cantidad de desgaste en función de la dureza Brinell para ensayos de laboratorio. Se utilizaron partículas abrasivas de granate de 100 μm . La carga normal fue de 66,7 N. (Tylczak et al., 1999).....	10
Figura 1-5: (a) Arado de Cinceles rígido tipo parabólico. (b) herramienta cincel.....	11
Figura 1-6: Laminas desgastadas por partículas de suelo, con espesores en pulgadas de 0,25; 0,375; 0,5; 0,625 y 0,75 (Moore, 1975).....	13
Figura 1-7: Desgaste abrasivo de las cuchillas de un arado rotativo con deformación plástica y microcorte (González et al., 2007).....	15
Figura 1-8: Efecto de la humedad del suelo sobre el desgaste de dos herramientas con durezas de 55 HRC y 45 HRC (Natsis et al., 2008).....	16
Figura 1-9: Efecto de la resistencia a la penetración del suelo (Mpa) sobre el desgaste de dos herramientas con durezas de 55 HRC y 45 HRC (Natsis et al, 2008).....	17
Figura 1-10: (a) Partícula con dos salientes (spikes), y circunferencia equivalente al área de la partícula (Stachowiak, 2000). (b) Método de cálculo SPQ basado en trazo de curvas cuadráticas trazadas en los salientes de la partícula (Mikli et al., 2001).....	21
Figura 1-11: (a) Desgaste a tres cuerpos en tribómetro ball on plate vs. SPQ (Spike quadratic parameter), donde: gb (partículas de vidrio), ss (arena de sílice), q (cuarzo), al (alumina) (Stachowiak y Stachowiak, 2001). (b) Desgaste a dos cuerpos (pin on disc) (Hamblin y Stachowiak, 1995).....	23
Figura 1-12: (a) Efecto de la morfología de las partículas en el desgaste del acero 1080 tratado térmicamente, a diferente nivel de dureza del metal (b) Morfología de las partículas: arriba, con arena seca de granulometría AFS 50/70; abajo, abrasivo de cuarzo triturado. (Swanson y Vetter, 1985).....	24

Figura 1-13:	Representación esquemática de pérdidas de desgaste por partículas duras en función de las propiedades del material y parámetros operacionales como: (a) dureza de las partículas abrasivas; (b) relación de dureza del abrasivo y del material. (Zum Gahr, K., 1998).....	25
Figura 1-14:	Fuerzas verticales (FV) y horizontales (FH) en función del desgaste de la herramienta de la surcadora (Spagnolo et al., 2006).....	27
Figura 1-15:	Influencia de el espesor del filo de corte de la cuchilla, en la fuerza de tiro (O), el consumo de combustible del tractor (+) y la cantidad de suelo trabajado (□) para un suelo arcilloso (todos los valores fueron expresados en porcentaje respecto al valor inicial de 100% observado para un espesor de 1 mm) (Natsis et al., 1999).....	28
Figura 2-1:	Lote experimental en Cotové (Google, 2010).....	31
Figura 2-2:	Diseño de la cuadrícula para el muestreo.....	32
Figura 2-3:	Toma de muestras de suelo en el lote de Cotové. (a) Disturbadas para la mayoría de las determinaciones en el Laboratorio de Suelos. (b) Sin disturbar para determinar Da.....	33
Figura 2-4:	Método para determinar la morfología de las gravillas. a) Fotografía de las partículas. b) Imagen procesada de las partículas en forma binaria por el programa angulosidad.....	34
Figura 2-5:	Flujograma completo para determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del suelo.....	37
Figura 2-6:	Dinamómetro instalado entre los dos tractores - arado de cincel operando con un solo vástago.....	38
Figura 2-7:	Mapa kriging de residuales de Log ₁₀ Limo (RestendlogL, %) y distribución de los tratamientos y líneas experimentales realizados en los dos suelos del lote de Cotové (las líneas punteadas delimitan de manera aproximada los dos tipos de suelos hallados en el lote de estudio).....	40
Figura 2-8:	Nivel del suelo respecto a la profundidad de trabajo de la herramienta de arado de cincel (ancho: 65 mm; profundidad máxima herramienta: 300±20 mm; canillera, con profundidad máxima de trabajo de 100 mm y ancho de 35 mm.).....	41
Figura 2-9:	(a) Arado de cincel. (b) Instalación de la herramienta sobre la punta de cincel.....	41
Figura 3-1:	Gráfico de cajas de la granulometría del suelo de Cotové (a) granulometría subdividida en todos los grupos de tamaños de partículas (%) (b) Granulometría dividida en dos componentes, tierra fina y fragmentos de roca (%). (A: arenas; G: gravillas).....	50
Figura 3-2:	Gráficos de burbujas de la distribución espacial relativa de los valores de algunas propiedades superficiales del suelo de Cotové. a) T (tierra fina, en g); b) FR (fragmentos de roca, en g). c) MO (materia orgánica, en %).....	51
Figura 3-3:	Minerales hallados en el lote de estudio (Cada subdivisión de la escala corresponde a 0,2 mm). (Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia).....	53
Figura 3-4:	Promedio de porcentaje de minerales hallados en el lote de	

	estudio (determinado para 57 sitios).....	57
Figura 3-5:	Mapas kriging del lote de estudio: a) MO (materia orgánica, %); b) T (tierra fina); c) FR (fragmentos de roca); d) Ha (dureza de las partículas de suelo); e) distribución de limos (residuales log. limos: reslogL) y distribución de gravilla media (logGm).....	59
Figura 3-6:	Peso de las variables en los tres primeros componentes principales.....	62
Figura 3-7:	Medias e intervalos LSD (al 95%) de la dureza de herramientas.....	64
Figura 3-8:	Imágenes de estereoscopio de herramienta P5 antes de los experimentos de campo. (a) Parte inferior central de la herramienta, los círculos corresponden a medidas de dureza HRB (cada número de la escala corresponde a 1mm). (b) Vértice derecho.....	65
Figura 3-9:	Componentes principales del suelo de Cotové respecto a las variables consideradas para el desarrollo de los modelos.....	70
Figura 3-10:	Mapas del comportamiento de cada una de las variables en los diferentes tratamientos. Eij indica tipo de tratamiento, i la velocidad (1, 2 y 3, corresponde a 2, 3 y 4 km/h, respectivamente) y j tipo de suelo (1 y 2, corresponde a franco arcilloso y franco limoso, respectivamente). Las barras oscuras indican suelo franco arcilloso, y las barras claras suelo franco limoso.....	71
Figura 3-11:	Herramientas (P7), (a) antes de experimentos, (b) luego de experimentos de campo (280 m recorridos), redondeo en los dos vértices extremos de la derecha.....	79
Figura 3-12:	Aspecto de la superficie de desgaste de la herramienta P5: (a) vértice inferior izquierdo, con deformación plástica y presencia de algunos surcos; (b) extremo inferior, con desprendimiento de material, deformación plástica y surcos de desgaste.....	80
Figura 3-13:	Ecuaciones de tendencia de la periferia de cada vértice de la herramienta luego de los experimentos de campo y área de desgaste respecto al área inicial de la herramienta (el área de desgaste corresponde a la región donde se localiza el recuadro "área desgaste: ", encima o abajo de la curva de tendencia, según el caso), y la curva de tendencia el límite del desgaste: (a) Herramienta P3, vértices izquierdo y derecho; (b) herramienta P7, vértices izquierdo y derecho; (c) Herramienta P5, vértices izquierdo y derecho.....	81
Figura 3-14:	imágenes de desgaste de las herramientas: (a) P3, en E11; (b) P7, en E21; (c) P12, en E12; (d) P9, en tratamiento E22; (e) P6, en E32; (f) P5, en E31; (g) P5, antes del tratamiento. La mínima subdivisión de la escala de medida ubicada en la parte superior de las figuras corresponde a 1 mm.....	83
Figura 3-15:	Comportamiento de Yh: (a) con el cambio de velocidad para cada suelo (franco arcilloso y franco limoso), (b) con el cambio de suelo para tres velocidades (2, 3 y 4 km/h).....	89

Figura 3-16: Comparación del desgaste Y_h (N.s-1): datos de campo vs. obtenidos con el modelo de análisis dimensional (la variable Morfología de partículas se determinó con el método SPQ).....	92
Figura 3-17: Relaciones entre grupos adimensionales.....	93
Figura 3-18: Regresión multivariada para Y_h total M-SPQ con variables del suelo (FR/T, M, MO y W) vs. pérdida de peso de la herramienta (Y_h).....	96
Figura 3-19: Comparación del desgaste Y_h (N.s-1): datos de campo vs. obtenidos con el modelo de regresión múltiple (la variable morfología de partículas se determinó con el método SPQ).....	96

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Granulometría de un suelo agrícola (USDA, 2004).....	20
Tabla 1-2: Dureza de minerales presentes frecuentemente en suelos agrícolas (Serverdev, 1984).....	25
Tabla 1-3: Clases de suelos según contenido de MO (Ibáñez et al., 2006).....	26
Tabla 1-4: Fuerzas verticales (FV) y horizontales (FH) actuantes sobre la herramienta en función de las diferentes tasas de desgaste (Spagnolo et al., 2006).....	27
Tabla 2-1: Combinación de las variables independientes (controlables) del experimento.....	39
Tabla 2-2: Equivalencia aproximada entre dureza Rockwell B y Vickers para aceros no austeníticos (Davis, 2002).....	42
Tabla 2-3: Propiedades y/o factores seleccionados para explicar la abrasividad de suelos agrícolas.....	44
Tabla 2-4: Descomposición de los parámetros en sus dimensiones básicas.....	45
Tabla 2-5: Matriz dimensional del experimento.....	47
Tabla 3-1: Principales estadísticos de las mediciones de granulometría y contenido de materia orgánica realizadas en el lote No. 8 del Centro Agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia.....	49
Tabla 3-2: Dureza ponderada de las gravillas finas (2 – 5 mm) calculada en cada uno de los sitios de la malla de muestreo original (Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia).....	56
Tabla 3-3: Principales estadísticos de la dureza de partículas de suelo (Ha).....	57
Tabla 3-4: Morfología por métodos de puntas (SPQ) y de perímetros (MP) de las gravillas (2 – 5 mm), calculada en cada uno de los sitios de la malla de muestreo original.....	57
Tabla 3-5: Principales estadísticos de la variable morfología de partículas de suelo (M), por dos métodos: MP y SPQ.....	58
Tabla 3-6: Valores propios de los componentes principales y varianza explicada por ellos.....	61

Tabla 3-7:	Peso de las variables en los tres primeros componentes principales.....	61
Tabla 3-8:	Parámetros de la semivariografía de las propiedades estudiadas (Alcance = 63,25 m, lag = 5,89 m, pares en el lag 1 = 65). (Centro Agropecuario Cotové).....	63
Tabla 3-9:	Estadísticos básicos de la dureza de las herramientas seleccionadas (HRB).....	63
Tabla 3-10:	Análisis de varianza con prueba de rangos múltiples LSD (HRB).....	64
Tabla 3-11:	Tratamientos y líneas experimentales (o repeticiones) a tres velocidades de trabajo (v1, v2 y v3) y en dos suelos (s1 y s2).....	65
Tabla 3-12:	Propiedades de las variables medidas durante los tratamientos (n = 58).....	66
Tabla 3-13:	Correlaciones parciales de los resultados experimentales para las situaciones: todo el lote (M-SPQ), todo el lote (M-MP), suelo 1 y 2 (M-SPQ y M-MP).....	67
Tabla 3-14:	Principales estadísticos de las variables medidas o calculadas en cada tratamiento.....	72
Tabla 3-15:	Análisis de varianza con prueba de rangos múltiples LSD para cada relación de tratamientos.....	73
Tabla 3-16:	Comparaciones entre tratamientos (las casillas sombreadas presentan diferencias estadísticas significativas).....	77
Tabla 3-17:	Relaciones entre tratamientos Eij (más abrasivo/menos abrasivo) y resultado de las variables en las relaciones entre tratamientos....	76
Tabla 3-18:	Correlaciones parciales del comportamiento de las variables en las relaciones entre tratamientos.....	78
Tabla 3-19:	Espesores de las herramientas medidos en tres puntos (los dos extremos y en el centro) y prueba LSD.....	82
Tabla 3-20:	Estadísticos del modelo obtenido con regresión multivariada para el lote experimental de Cotové.....	95
Tabla 3-21:	Límites de las variables o factores en los cuales tiene aplicación el índice de abrasividad de suelos agrícolas.....	98
Tabla 3-22:	Calificación de cada variable en función de su linealización con los factores de abrasividad (ai).....	100
Tabla 3-23:	Correlación entre el índice de abrasividad (Ia) y Yh.....	100
Tabla 3-24:	Calificación de factores de abrasividad e índice de abrasividad de un suelo vértico de Cotové hallado para varios niveles de subdivisión.....	101

Introducción

El uso racional y eficiente de los recursos energéticos en los procesos de minería, agroindustria y manufactura, es una estrategia de desarrollo que exige tener un conocimiento y un control adecuado de los fenómenos de fricción y desgaste.

Por lo tanto, cada vez se considera más relevante el estudio sistemático del tribosistema suelo – herramienta de modo que a partir de la identificación de los mecanismos de desgaste actuantes se logren establecer las principales variables que afectan la degradación de las superficies de las herramientas agrícolas, siendo este un punto de partida en la búsqueda de materiales alternativos que se adapten apropiadamente a las labores de preparación de suelos.

Por otro lado, es necesario investigar sobre los suelos agrícolas desde el punto de vista de su abrasividad, con el propósito de construir hipótesis, correlaciones y teorías que den explicación científica del por qué y cómo estos suelos ocasionan desgaste en las superficies de las herramientas.

De modo general, en la optimización de un sistema que tenga por objeto mejorar la resistencia al desgaste, se deben identificar en primer lugar los mecanismos de remoción de material actuantes sobre las superficies. En el caso de daño por acción de partículas duras, por ejemplo, deben ser consideradas las propiedades físicas y mecánicas del abrasivo, así como algunas propiedades del material que experimenta el desgaste tales como la dureza, morfología, la tenacidad a la fractura, entre otros.

Resulta entonces pertinente cuantificar de manera sistemática y objetiva qué tan abrasivo es determinado tipo de suelo, logrando una identificación clara y un entendimiento detallado de los factores que afectan dicha abrasividad. Por lo que se requiere establecer modelos objetivos que permitan estimar la abrasividad de los suelos a partir de sus propiedades físicas y mecánicas.

Entrando en detalles específicos de la propuesta de investigación, la principal justificación para elegir la herramienta agrícola del arado de cincel como modelo mecánico en la investigación de la abrasividad del suelo, es básicamente que tiene un relativo grado de similitud con otras herramientas agrícolas de uso frecuente en nuestro medio, como las herramientas del subsolador, rastra de dientes, rastra de púas, algunas cultivadoras, entre otras, las cuales son clasificadas como de labranza vertical, y operan deslizándose en el suelo a una profundidad previamente seleccionada, y además han demostrado que son las más adecuadas para las condiciones ambientales de los países tropicales, al posibilitar la presencia de cobertura vegetal que disminuye efectos erosivos y contrarresta las pérdidas de agua por evaporación.

Natsis *et al.* (2008) consideran que la determinación del tipo de desgaste en herramientas de labranza es necesario, ya que el desgaste afecta gravemente a la planificación de la producción, calidad de labranza, el consumo de energía (o las pérdidas de energía), y por último, los costos de producción de productos agrícolas.

Desde el punto de vista económico, la pérdida de especificaciones de las herramientas agrícolas debido al desgaste encarece los costos de las operaciones de labranza al hacer necesarios recambios continuos y puede disminuir la calidad de la labor efectuada en términos de volumen de suelo removido y profundidad de trabajo (en caso de no ser cambiadas oportunamente).

Un estudio realizado en Canadá por el National Research Council (Bayhan, 2006), determinó que las pérdidas anuales totales en el sector agrícola debido a la fricción de elementos mecánicos, suman aproximadamente US 320 millones y debido específicamente al desgaste, aproximadamente US 940 millones.

Los costos generados por la abrasión suelen ser tan altos que pueden representar hasta el 3% del PIB de un país industrializado, y se acentúan en los subdesarrollados por cuanto la reposición es mucho más onerosa debido al costo de las importaciones, lo que representa una pérdida importante de divisas para el país y hace que el control y la recuperación sean necesidades imperiosas. La abrasión es responsable por las pérdidas de masa por desgaste más acentuadas en sistemas productivos, y por consiguiente es el fenómeno de desgaste que presenta mayor impacto dentro del costo de las industrias (Toro, 2003).

Por otro lado, se debe tener presente también que los tiempos perdidos producto del desgaste, tienen efecto directo en el incremento de los costos operativos de las máquinas agrícolas. En parte se justifica la anterior afirmación, con base en un estudio realizado en Australia, donde se concluyó que anualmente se pueden perder alrededor de 400.000 horas en tareas de recambios de componentes de máquinas agrícolas (Ferguson *et al.*, 1998).

Por tanto, será un aporte científico a nivel nacional e internacional el desarrollo de un modelo para estimar la capacidad abrasiva de suelos a determinado rango de profundidad durante el proceso de labranza en función de las propiedades físicas y mecánicas del suelo y de las condiciones de operación del sistema suelo –herramienta. Aunque se realizó la investigación en una región con dos tipos de suelos diferentes, se tendrán los parámetros básicos que los diferencian, y la base para que a futuro se proyecten estudios similares en otros lugares con otras condiciones y otros diseños de herramientas.

La hipótesis que se tuvo siempre en mente por el equipo investigador fue: “Es posible definir el índice de abrasividad de un suelo agrícola para una operación de labranza específica, el cual está influenciado por las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del suelo, y también por factores operacionales de la herramienta”.

El objetivo general de la investigación fue desarrollar un modelo para estimar la capacidad abrasiva de suelos con características vérticas (Santa Fé de Antioquia) durante el proceso de labranza en función de sus propiedades físicas, mecánicas y estructurales, y de las condiciones de operación de una herramienta tipo cincel.

Los siguientes fueron los objetivos específicos:

- Determinar algunas propiedades físicas, mecánicas y estructurales de suelos con las características ya descritas, con el propósito de tener referentes de propiedades a considerar en el cálculo de la abrasividad.
- Estimar el efecto de las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del tipo de suelo sobre su capacidad abrasiva.
- Proponer un modelo de abrasividad a partir de los suelos estudiados, teniendo como base modelos previamente propuestos y/o resultados experimentales.
- Evaluar el modelo propuesto para estimar la capacidad abrasiva de los tipos de suelos estudiados, con los resultados experimentales obtenidos durante la operación de labranza.

Los resultados de esta investigación serán de interés directo para: Investigadores y comunidad académica en general, empresas fabricantes de herramientas agrícolas, entidades y personas que tengan relaciones directas o indirectas con el sector agrícola, específicamente en temas de preparación de suelos y desarrollo de herramientas agrícolas.

Por otro lado se acrecentará los referentes bibliográficos, con nuevos conocimientos apropiados. Se publicarán en revistas indexadas nacionales o internacionales artículos referentes al tema de investigación, entre los cuales se incluirá un artículo de revisión.

El estado del arte y la revisión de literatura del proyecto será también un aporte interesante a considerar, pues son varias las investigaciones que se vienen realizando a nivel mundial en algunos aspectos que relacionan la abrasividad del suelo y el desgaste de las herramientas agrícolas, y que comprenden algunos temas planteados en la tesis. De tal manera que al presentar los aportes de otros investigadores en conjunto (la gran mayoría de carácter internacional), se dispondrá de una base técnica que potencialmente puede motivar la investigación en otros aspectos novedosos, como los nuevos materiales, nuevos diseños, condiciones apropiadas para trabajar un suelo desde el punto de vista tribológico, nuevos procedimientos para determinar la morfología de las partículas del suelo, entre otros.

Finalmente es importante resaltar que el presente proyecto de investigación hace parte de un macroproyecto donde se integró en varios niveles la academia con estudiantes de pregrado, maestría y doctorado; profesores de tres facultades de la Universidad Nacional (Ciencias, Minas y Ciencias Agropecuarias), grupos de investigación (Grupo de Tribología y superficies, Grupo de Variabilidad de suelo, Grupo de Ingeniería Agrícola, GEUN (Ingeniería Mecánica) y Grupo de Ingeniería Física), adicionalmente se tiene participación de la empresa privada (Agroindustrial Apolo e industrias HRV). El macroproyecto tuvo varios niveles de investigación: nuevos materiales y recubrimientos de herramientas de cincel, desarrollo de un tribómetro para medir el desgaste de herramientas agrícolas y abrasividad de suelos agrícolas. Donde los temas y desarrollos de un grupo retroalimenta a los de otros grupos. En el presente año se tiene pensado conseguir más recurso e integrar más personas a temas que relaciones la tribología, los suelos y la ingeniería agrícola.

1. Marco teórico

1.1 Introducción

De modo general, en la optimización de un sistema para resistencia al desgaste deben identificarse en primer lugar los mecanismos de remoción de material actuantes sobre las superficies. En el caso de daño por acción de partículas duras, por ejemplo, deben ser consideradas las propiedades físicas y mecánicas del abrasivo, así como algunas propiedades del material de la superficie desgastada, como: dureza, tenacidad a la fractura y coeficiente de endurecimiento por deformación, entre otros. A partir del estudio de estas variables y de la observación detallada de las superficies puede determinarse si los mecanismos de remoción de material son predominantemente dúctiles (con deformación plástica y micro-corte) o frágiles. Usando toda esta información, es posible determinar las características de la superficie deseables para llegar a una condición óptima de resistencia al desgaste, manteniendo siempre la relación costo / beneficio en un punto de equilibrio (Toro, 2003).

El tipo y la intensidad de desgaste en las herramientas agrícolas es función de la naturaleza y propiedades mecánicas de las partículas del suelo, de las condiciones de operación y de las propiedades mecánicas del material de la herramienta (Fielk, 1996; Guul-Simonsen *et al.*, 2002). La humedad del suelo es otro de los factores claves que se debe tener presente en el desgaste (Yu, 1990; Bayhan, 2006).

El desgaste de las herramientas de labranza, depende más específicamente según Guul-Simonsen *et al.* (2002) de:

- proceso térmico de fabricación y geometría de las herramientas;
- condiciones de labranza, como área labrada (o el tiempo de trabajo), velocidad y profundidad de operación;
- fuerzas de contacto entre el suelo y el área de la superficie de contacto de la herramienta;
- la proporción, la dureza, la angulosidad y la forma de las partículas del suelo;
- el contenido de humedad del suelo;
- la densidad y las propiedades mecánicas del suelo; y
- efectos ambientales.

Todos los anteriores factores se refieren principalmente a las condiciones del suelo y diseño de arado. Natsis *et al.* (2008) afirmó que la resistencia al desgaste de las herramientas del arado se asocia principalmente a la dureza de su superficie y que debe haber una relación entre la dureza de la herramienta y la dureza de las partículas con el

fin de mantener efectiva resistencia al desgaste, pero también debe tenerse en cuenta el hecho de que la alta dureza implica fragilidad.

El desgaste más intensivo resulta de las partículas de cuarzo con dureza 950–1000 kg/mm², más alta respecto a la dureza del acero carburizado (850–900 kg/mm²) con el cual se fabrican usualmente algunas herramientas agrícolas. Así mismo, se demuestra que cuando el contenido de partículas de arena de un diámetro superior a 0,01 mm se incrementa, aumenta la cuota de desgaste (Fielk, 1996).

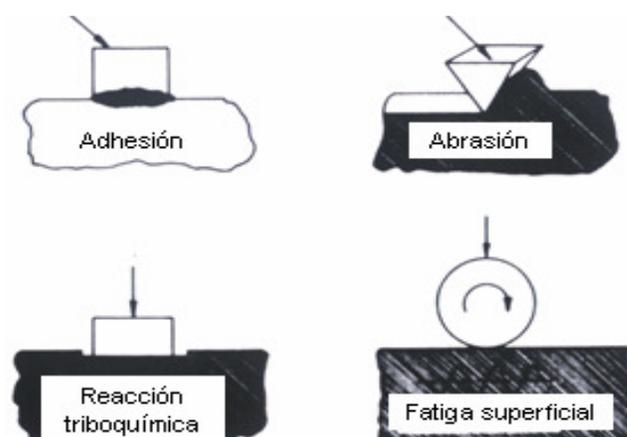
Es frecuente expresar el desgaste de acuerdo al método de Gavrilov (pérdida de peso en un área arada) o por el método de control de dimensiones geométricas. La ecuación (1.1) expresa el peso perdido por una herramienta agrícola (Kp) en (g/ha), donde P es el peso antes de la labranza, P_1 el peso después de la labranza y F es el área del lote preparado (Natsis, 2008).

$$Kp = \frac{P - P_1}{F} \quad (1.1)$$

1.2 Conceptos básicos sobre mecanismos de desgaste

Dependiendo de los diferentes tipos de acciones sobre la superficie, se pueden clasificar los procesos de desgaste de acuerdo a lo que puede denominarse “modos de desgaste” (Zum Gahr, 1987). Una clasificación que agrupa concisamente todas las clases de desgaste es aquella que se hace de acuerdo a los mecanismos fundamentales de desgaste. Según la norma DIN 50320 (1979) existen sólo cuatro mecanismos de desgaste básicos y la combinación de éstos genera todos los procesos de desgaste conocidos. Estos mecanismos son: adhesión, abrasión, fatiga superficial, y reacción triboquímica. La Figura 1-1 muestra un esquema de estos mecanismos.

Figura 1-1: Descripción esquemática de los cuatro principales mecanismos de desgaste (Zum Gahr, 1987).



- Desgaste adhesivo: se produce por la formación de juntas entre regiones localizadas de dos superficies, las cuales se rompen y cuando son separadas nuevamente el material es removido de uno o de ambos componentes.
- Fatiga superficial: repeticiones cíclicas de esfuerzo sobre la superficie de una pieza, induciendo en cada repetición un daño de naturaleza mecánica de bajo grado, generando deformación en las capas superficiales.
- Reacción triboquímica: por contacto entre dos superficies sólidas que reaccionan con el medio ambiente corrosivo (este puede ser gaseoso o líquido).
- Desgaste abrasivo: remoción o desplazamiento del material de una superficie debido al contacto con otra superficie en movimiento relativo, generalmente de mayor dureza.

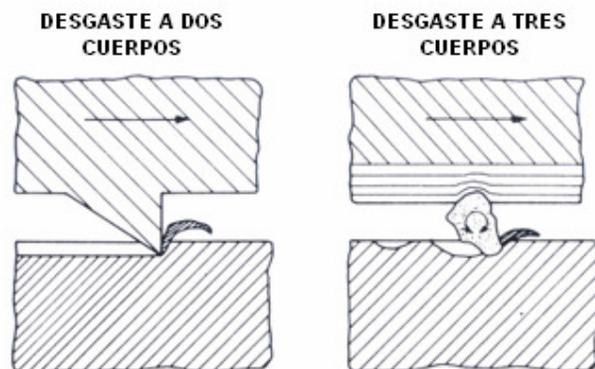
1.2.1 La abrasión

La ASTM (1987) define el desgaste abrasivo como la pérdida progresiva de material de una superficie sólida debido a partículas duras o protuberancias que son forzadas contra dicha superficie en movimiento relativo con respecto a ellas. Desde el punto de vista de la configuración del sistema tribológico, este tipo de desgaste puede clasificarse en dos grandes grupos:

- Abrasión a dos cuerpos, cuando las asperezas de dos superficies sólidas interactúan debido a la aplicación de una carga y la existencia de un movimiento relativo. En este caso, las partículas abrasivas están fijadas a una de las superficies.
- Abrasión a tres cuerpos, cuando entre dos cuerpos existen partículas duras con posibilidad de movimiento relativo respecto a las dos superficies.

La Figura 1-2 muestra una representación del desgaste a dos y tres cuerpos.

Figura 1-2: Desgaste a dos y tres cuerpos (Zum Gahr, 1987).



Normalmente la tasa de desgaste bajo la condición de desgaste abrasivo a dos cuerpos es 2 o 3 órdenes de magnitud mayor que en la condición de desgaste a tres cuerpos. Esto es una consecuencia de la posibilidad que tienen las partículas abrasivas para rotar y adoptar configuraciones con menor capacidad de corte cuando la condición es a tres cuerpos. Cuando las partículas están fijas a una de las superficies (es decir, en la condición de desgaste a dos cuerpos) la capacidad de corte es aumentada porque los niveles de esfuerzos localizados son más grandes y un mayor número de partículas pueden efectivamente cortar la otra superficie. Esta afirmación está asociada a un concepto introducido por Sedriks y Mulhearn (1963), quienes encontraron que para cada par abrasivo-superficie existe un ángulo de ataque crítico del abrasivo, por encima del cual el mecanismo de microcorte de la superficie efectivamente ocurre.

En el numeral 1.4 se incluyen algunas referencias donde se considera al desgaste abrasivo como el de mayor influencia en las herramientas agrícolas.

1.2.2 Mecanismos de desgaste abrasivo

Varios mecanismos se han propuesto para explicar como el material es removido de la superficie desgastada bajo la acción abrasiva de partículas duras o protuberancias. En materiales con comportamiento predominantemente dúctil ocurren generalmente deformación plástica, micro-corte y fatiga (Rabinowicz, 1965). Mecanismos de fractura frágil pueden ocurrir también, dependiendo de las propiedades mecánicas de la superficie (en especial la tenacidad a la fractura) (Zum Gahr, 1987). Debido a la complejidad del fenómeno abrasivo no hay un sólo mecanismo que se presente para todos los tipos de materiales.

1.2.3 Variables que afectan el desgaste abrasivo.

Las variables que influyen el tipo y magnitud del desgaste abrasivo pueden clasificarse en los siguientes grandes grupos:

- Características del abrasivo
 - Propiedades Mecánicas: dureza, tenacidad a la fractura
 - Geometría: tamaño y angulosidad
- Características de la Superficie
 - Dureza
 - Capacidad de Endurecimiento por trabajo
 - Tenacidad

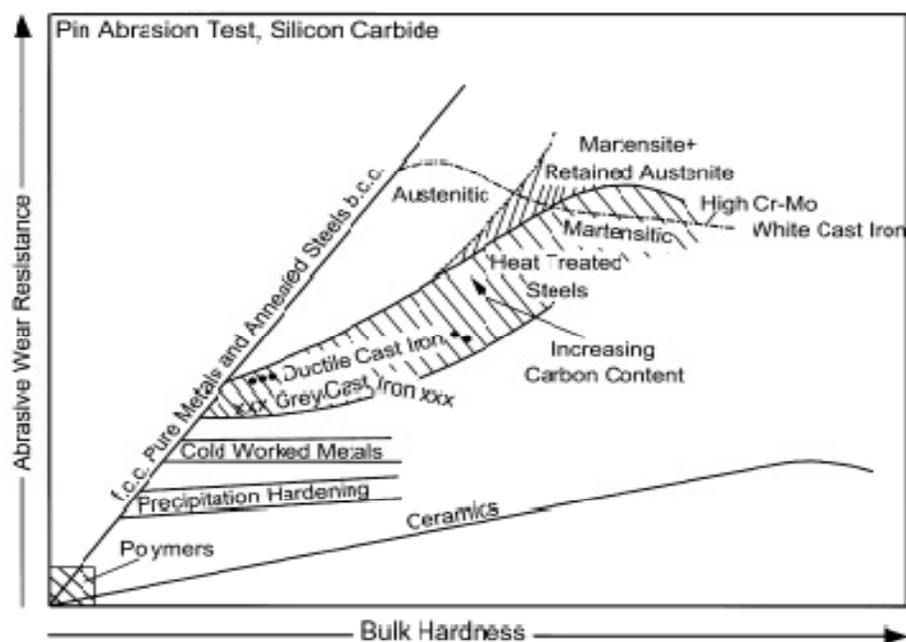
En lo que concierne a las características del abrasivo, se ha encontrado en numerosas experiencias que cuando la relación de durezas entre abrasivo y superficie (H_a/H_s) es superior al valor de 1,2 el régimen de desgaste pasa de una condición moderada a severa, con incidencia acentuada del mecanismo de microcorte (Torrance, 1981). En relación al tamaño de las partículas abrasivas, por otro lado, se ha observado que partículas mayores llevan a pérdidas de masa más grandes, hasta que se llega a un tamaño a partir del cual no hay variaciones significativas (Hutchings, 1992).

En términos de las propiedades de la superficie, son fundamentales tanto la capacidad de soportar carga como la capacidad de deformación de la microestructura. Se ha observado que el coeficiente de endurecimiento por deformación es un factor muy importante en el comportamiento de las superficies sometidas a abrasión, ya que puede determinar hasta qué punto la respuesta del material es dúctil (con mecanismos de deformación plástica y micro-corte) o frágil (con rotura por clivaje y agrietamiento). La dureza, por su parte, se constituye en uno de los parámetros más usados pero a la vez uno de los de más difícil interpretación. Esto se debe a las dificultades inherentes a la medición, en especial en áreas pequeñas y con altos niveles de deformación plástica.

De manera general se afirma que un aumento del contenido de carbono en los aceros, se relaciona con el aumento de la dureza, (Gill y Vanden Berg, 1968). Aunque algunos materiales a determinada dureza tienen comportamientos diferentes a lo esperado; obsérvese por ejemplo en la Figura 1-3 las curvas de los metales trabajados en frío, con comportamiento relativamente constante de resistencia al desgaste con el incremento de la dureza; o las fundiciones blancas con alto Cr – Mo con disminución de la resistencia al desgaste al incrementar la dureza.

El aumento en la dureza de la superficie trae consigo generalmente una mayor resistencia al desgaste en los aceros aleados, este aumento no es tan grande como se espera, debido a que el incremento de la resistencia al desgaste es en general 1/3 del incremento de la dureza de la superficie (Owsiak, 1997).

Figura 1-3: Resistencia al desgaste abrasivo (abrasión a dos cuerpos) de diferentes materiales medidos en ensayos a abrasión, variando la dureza de los materiales (Zum Gahr, 1998).



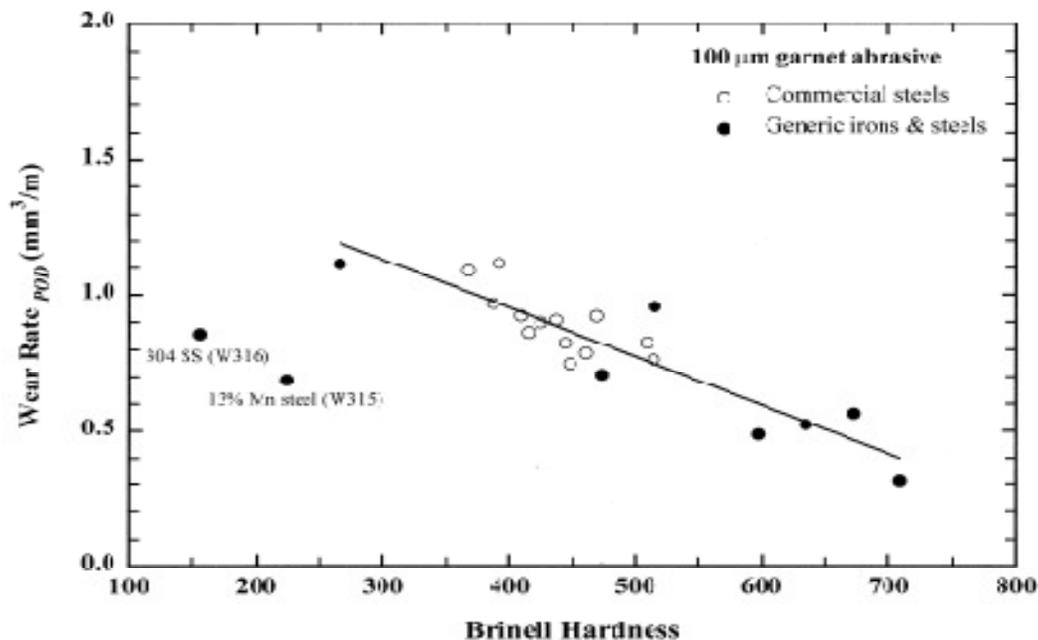
Por otro lado, estudios han mostrado que el endurecimiento por trabajo, durante los ensayos de desgaste también incrementa la dureza de las superficies sometidas al desgaste (Tylczak *et al.*, 1999).

Kelly y Hutching (2001) investigaron sobre la influencia del tamaño y angulosidad de las partículas abrasivas, para lo cual utilizaron partículas de sílice, dragonita y calcita, con tamaños promedio entre 2,39 y 150 μm . Encontraron, que los mayores efectos en la cantidad de desgaste se correlacionaban principalmente con su angulosidad.

De otra parte cuando la profundidad de penetración del abrasivo es mayor que el tamaño de las fases dispersas (en materiales compuesto), las propiedades de la matriz son muy importantes (Moore, 1975). La resistencia al desgaste abrasivo de los materiales compuestos depende de parámetros microestructurales como: dureza, forma, tamaño, fracción volumétrica y distribución de las fases incorporadas; también depende de las propiedades de la matriz y de las interfaces entre la segunda fase y la matriz (Zum Gahr, 1998).

La Figura 1-4 muestra la correlación de decrecimiento de la cantidad de desgaste con el incremento de la dureza del material, con la excepción del acero austenítico al 13% de Mn y el acero 304 SS, los cuales muestran más baja cantidad de desgaste que los endurecidos; estudios previos han mostrado que el endurecimiento por trabajo durante los ensayos de desgaste incrementan la dureza de las superficies sometidas al desgaste (Tylczak *et al.*, 1999).

Figura 1-4: Cantidad de desgaste en función de la dureza Brinell para ensayos de laboratorio. Se utilizaron partículas abrasivas de granate de 100 μm . La carga normal fue de 66,7 N. (Tylczak *et al.*, 1999).



Para el caso de las herramientas de arado, en los últimos años en Colombia se ha fabricado gran cantidad de herramientas con aceros de mediano contenido de carbono (ej. 15B30), los cuales tienen una dureza aceptable (aproximadamente 40 HRC), y tienen la ventaja de tener altos niveles de tenacidad, por lo que las fracturas frágiles se han disminuido en las operaciones de campo, respecto a las herramientas fabricadas con contenidos altos de C (ejemplo, con aceros 1070).

En las herramientas de arado fabricadas en Colombia no son muy comunes los materiales compuestos (por dos o más fases), sin embargo se considera que es necesario investigar sobre los materiales compuestos más apropiados, para el buen desempeño de las herramientas agrícolas.

1.3 Arados de cinceles (escarificadores)

Para la preparación de suelos, se cuenta con diferentes alternativas de equipos agrícolas (arados de disco, vertedera, cincel, rotatorios; rastras de disco, púa, diente, etc.). Los anteriores equipos poseen diferentes diseños de sus herramientas que son las que están en contacto directo con el suelo, realizando operaciones de acuerdo a objetivos propuestos (roturar, cortar, voltear, nivelar, sembrar, ente otras). En la agricultura moderna se recomienda preparar los suelos con herramientas de labranza vertical, un ejemplo son los arados de cincel, que son usados frecuentemente y que han sido clasificados por varios investigadores como equipos con menores impactos ambientales en comparación con otros (Cortés *et al.*, 2007; Luque *et al.*, 2007; Amezcuita, 1998; González, 1999). Los arados de cincel pueden ser rígidos (Figura 1-5) o vibratorios y pueden fragmentar el suelo hasta profundidades que generalmente no superan los 40 cm.

Figura 1-5: (a) Arado de Cinceles rígido tipo parabólico. (b) herramienta cincel.



(a)



(b)

Los cinceles no invierten el suelo, respetan su estructura, permitiendo una distribución uniforme del aire en toda la capa removida (Luque *et al.*, 2007).

Amezquita (1998) recomienda el uso de implementos de labranza vertical (cinceles y/o subsoladores) para disminuir la densidad aparente y resistencia a la penetración de suelos agrícolas. González (1999) concluyó que el sistema de preparación de suelos con mínimo impacto ambiental era la labranza vertical, y que incluso en sistemas donde se desea implementar la siembra directa, lo mejor es descompactar el terreno con implementos de labranza vertical.

1.4 Desgaste de herramientas agrícolas

Bayhan (2006) considera que el desgaste de metales en la agricultura es un problema antiguo, pero es un tema en el que se debe investigar mucho más. Para Bhakat *et al.* (2004) la falla de herramientas agrícolas se asocia básicamente al desgaste causado por abrasión debido a la interacción del material de la superficie con el suelo. Las herramientas agrícolas desgastadas son usualmente menos efectivas para el control de malezas, labranza o siembra, y pueden causar mayores requerimientos de tracción y generar más fallas (Bayhan, 2006). Zollinger *et al.* (1998) considera que los implementos agrícolas son sometidos a abrasión de bajo esfuerzo; el metal es desgastado por la acción repetida del rozamiento de partículas a través de la superficie a distintas velocidades sin fracturar las partículas abrasivas.

Las partículas de suelo están compuestas fundamentalmente por sílice, con dureza alrededor de 1100 HV (Foley *et al.*, 1984).

Complementado el párrafo anterior se tiene que el desgaste no es una característica intrínseca del material si no una características del sistema, que dependen de la carga, velocidad, temperatura, dureza, presencia de otros materiales en el suelo y de las condiciones ambientales (Bhakat *et al.*, 2004). Variables metalúrgicas, como dureza, espesor, microestructura y composición química, tienen importante influencia en el desgaste abrasivo (Yu, 1990).

De acuerdo a investigaciones realizadas, en Turquía se presenta en promedio de 90 a 210 g/ha de desgaste por labores de arada, y específicamente en arados de cincel se ha reportado de 23 a 40 g/ha de desgaste (Bayhan, 2006).

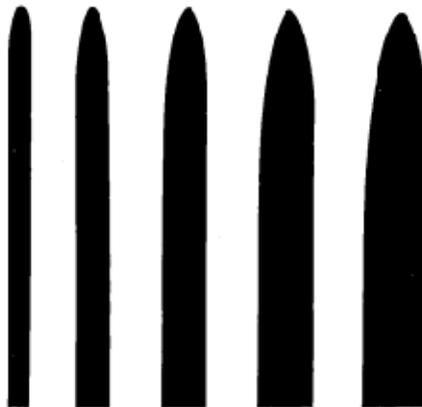
Bayhan (2006) afirma que una gran parte de las pérdidas de energía pueden ser atribuidas al desgaste de las herramientas, donde la cantidad de suelo movido por las herramientas es enorme. El proceso por el cual las herramientas se desgastan incluye impacto, abrasión, desgaste vibratorio (*fretting*) y acción química. La eficiencia de la herramienta y su capacidad de trabajo están también determinadas por la respuesta del suelo a la herramienta.

El resultado del desgaste en equipos de labranza ocasiona pérdidas de tiempo, pérdidas de energía e incremento en los costos de producción. La cantidad de acero que se mezcla con el suelo, la pérdida de tiempo debida al reemplazo de las piezas gastadas en los equipos, el trabajo manual y las pérdidas de producción afectan la economía nacional gravemente (Bayhan, 2006)

Investigadores han intentado por años reducir el costo de las operaciones de labranza reduciendo la fricción del metal con el suelo. Se ha propuesto utilizar capas de teflón, emulsiones, líquidos y electro ósmosis. Sin embargo estas técnicas no han sido muy eficaces en el sector agrícola (Kushwaha *et al.* (1990), citado por Bayhan, 2006).

Moore (1975) menciona que Richardson, a finales de los años 60, experimentó con placas metálicas rectangulares las cuales tenían diferente espesor, y las colocó paralelas al suelo (trabajando a una profundidad constante de 120 mm). En la Figura 1-6, se puede visualizar la geometría de las placas utilizadas por Richardson en su investigación, donde se observa el tipo de desgaste en todas las placas, a pesar de las dimensiones diferentes; Richardson demostró que la relación de la longitud focal de la parábola al espesor de la cuchilla permanecía aproximadamente constante, variando poco en diferentes suelos.

Figura 1-6: Laminas desgastadas por partículas de suelo, con espesores en pulgadas de 0,25; 0,375; 0,5; 0,625 y 0,75 (Moore, 1975).



Factores de la herramienta que más influyen en su desgaste

Los factores de la herramienta que más influyen en su desgaste son: dureza, resistencia mecánica, resistencia a la propagación de grietas y su composición química (Gill y Vanden Berg, 1968).

Owsiak (1997) considera que en la resistencia al desgaste de las herramientas agrícolas influye:

- Composición química del acero y su tratamiento térmico
- Profundidad de operación
- Distancia recorrida
- Posición de los elementos en la herramienta
- Diseño de la herramienta.

Natsis *et al.* (2008), planteó que los siguientes factores son los que tienen mayor influencia:

- Material, tratamiento térmico y forma
- Condiciones de labranza, como área de trabajo, velocidad y profundidad de trabajo
- Fuerzas entre la herramienta y el suelo

En el sistema suelo - herramienta se debe tener en cuenta la presión sobre la superficie de contacto, la duración del contacto y velocidad de contacto (Gill y Vanden Berg, 1968).

Moore (1975), recomienda considerar las propiedades mecánicas y estructura metalúrgica de las herramientas.

Resumiendo, los factores que más influyen en el desgaste de las herramientas que han sido considerados por varios investigadores son los siguientes:

- Propiedades mecánicas y estructurales del material
- Diseño de la herramienta
- Profundidad de operación
- Área de trabajo- duración del contacto
- Velocidad de trabajo
- Fuerzas entre la herramienta y el suelo
- Posición de los elementos en la herramienta

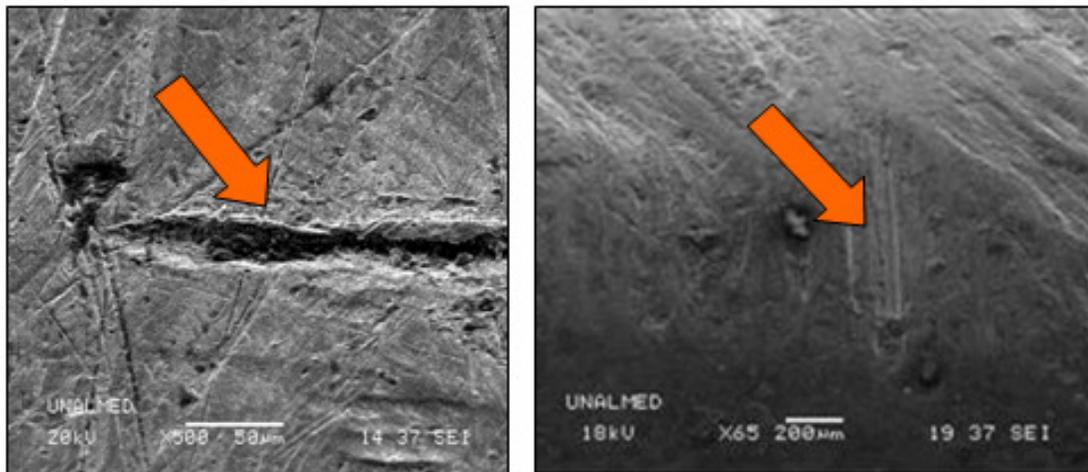
En las propiedades mecánicas y estructurales del material se debe incluir su dureza, composición química y tratamientos térmicos. Lo ideal sería que las herramientas tuvieran niveles de dureza superiores a los del abrasivo, pero esto potencialmente aumentaría la fragilidad, aunque con los tratamientos térmicos se consigue disminuir la fragilidad para mayor resistencia a fuerzas de impacto. En cuanto a la composición química, por ejemplo en los últimos años se ha preferido fabricar gran número de herramientas con pequeñas adiciones de boro, lo que aumenta la tenacidad de los aceros, además también es muy frecuente adiciones de cromo para mejorar su dureza y resistencia a la corrosión.

Owsiak (1997) plantea un hecho muy frecuente en varios tipos de herramientas agrícolas, y es que su diseño se basa en trabajos empíricos. Sin embargo esto es algo

que paulatinamente se va solucionando con base en el apoyo a la investigación e innovación en estos temas. Por ejemplo, trabajos de investigación como el reportado por Lu-Quan Ren *et al.* (2001), donde se hace una revisión de la adhesión herramienta – suelo, y se analiza la estructura morfológica exterior de algunos animales (lombrices, ácaros, etc.) y sus propiedades antiadherentes respecto al suelo, con el objetivo de proponer diseños novedosos de herramientas con niveles mínimos de adhesión.

También se destaca los análisis realizados por Rabinowicz (1965) quien afirma que en materiales con comportamiento predominantemente dúctil ocurre generalmente deformación plástica, micro-corte y fatiga. Mecanismos de fractura frágil pueden ocurrir también, dependiendo de las propiedades mecánicas de la superficie (en especial la tenacidad a la fractura) (Zum Gahr, 1987). Para ilustrar lo anterior se presentan las imágenes obtenidas con cuchillas de arados rotativos (fabricadas con acero AISI 15B30) durante una investigación realizada en la Universidad Nacional (Figura 1-7), donde se aprecia desgaste abrasivo (con deformación plástica y microcorte); si bien la dureza de estas cuchillas es de aproximadamente 40HRC, tratadas térmicamente, el boro les da ciertos niveles de ductilidad, evitando la fractura frágil (González *et al.*, 2007).

Figura 1-7: Desgaste abrasivo de las cuchillas de un arado rotativo con deformación plástica y microcorte (González *et al.*, 2007).



1.5 Propiedades físicas y mecánicas de los suelos que afectan el desgaste de herramientas agrícolas.

Moore (1975) considera que el desgaste abrasivo generado por el suelo es un proceso complejo; éste autor estudió el volumen relativo de desgaste en relación con la carga y la distancia de deslizamiento, determinando que en el desgaste influye el contenido de piedras y la resistencia a la penetración. También investigó como los distintos tipos de abrasivos se pueden deteriorar de manera diferente durante el desgaste y que el volumen de desgaste depende también de las propiedades del material y de la estructura

metalúrgica. Richardson citado por Moore (1975) realizó numerosos trabajos de campo, midiendo el desgaste de varios materiales en diferentes suelos, donde correlacionó el desgaste del filo de cuchillas con la carga en la superficie y la distancia de deslizamiento, mediante la ecuación (1.2).

$$V = KFS \quad (1.2)$$

Donde V es el volumen desgastado, K es una constante, F es la carga en la superficie desgastada, y S es la distancia de deslizamiento. La constante K varía para diferentes materiales y abrasivos.

Natsis *et al.*, (2008) al realizar ensayos con cuchillas de arados tipo vertedera (para dos herramientas con valores diferentes de dureza) encontró en general que (el autor expresa el desgaste en pérdidas dimensionales promedio de la herramienta de corte):

- al aumentar el contenido de humedad del suelo el desgaste de las herramientas disminuía (Figura 1-8),
- al aumentar la resistencia a la penetración del suelo (dureza) el desgaste de las dos herramientas aumentó (Figura 1-9). Natsis *et al.* (2008) determinó la resistencia a la penetración del suelo con base en el modelo empírico de Ogriskov.

Figura 1-8: Efecto de la humedad del suelo sobre el desgaste de dos herramientas con durezas de 55 HRC y 45 HRC (Natsis *et al.*, 2008).

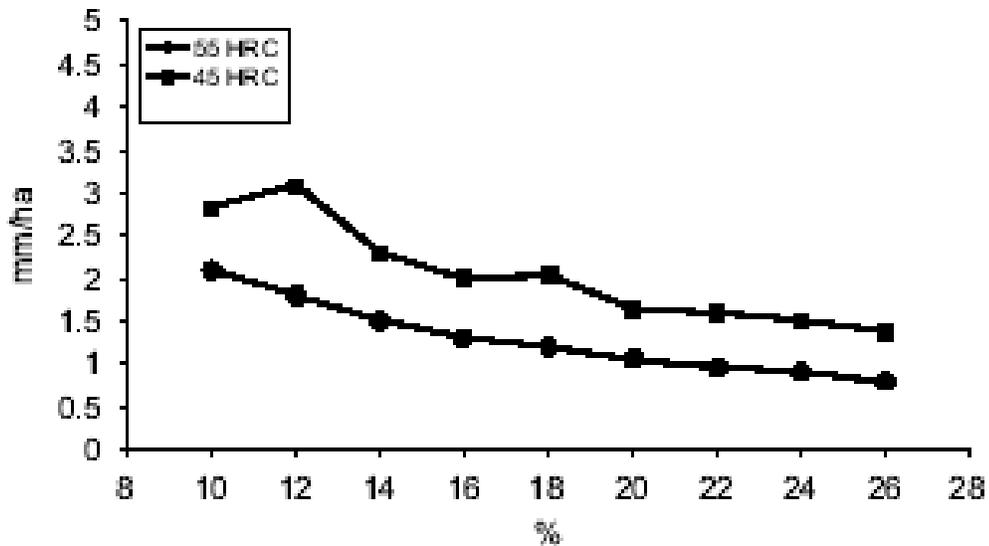
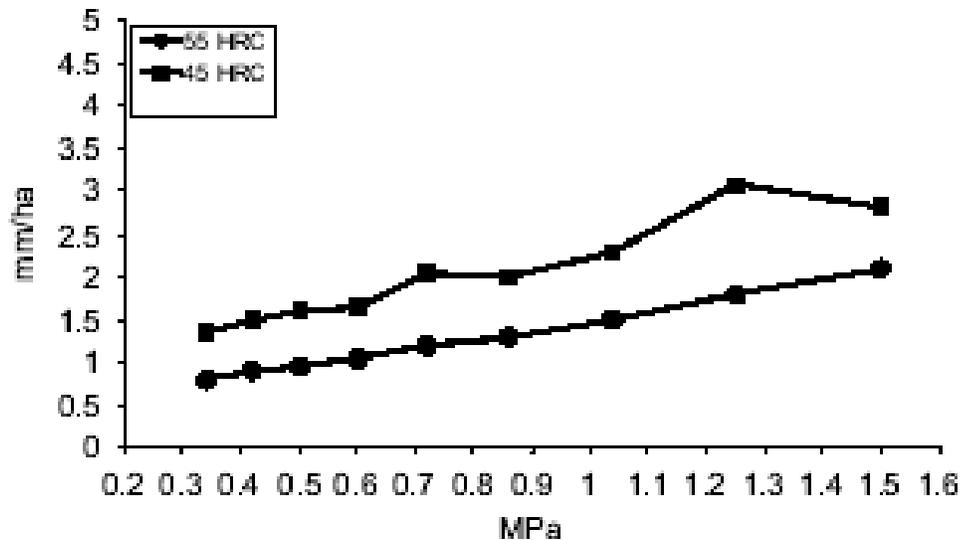


Figura 1-9: Efecto de la resistencia a la penetración del suelo (Mpa) sobre el desgaste de dos herramientas con durezas de 55 HRC y 45 HRC (Natsis et al, 2008).



Según Moore (1975), uno de los más significantes aportes de Richardson fue demostrar que el volumen de desgaste de un material decrece rápidamente cuando la relación dureza del material (H_m) a dureza del abrasivo (H_a) excede el valor de 0,85.

Un aspecto que está en pleno desarrollo investigativo, se relaciona con el procedimiento más efectivo para determinar cuantitativa (e incluso cualitativamente) la morfología (angulosidad) de las partículas. Investigadores como: Hamblin y Stachowiak (1995); Stachowiak (1998, 2000); Stachowiak, Stachowiak y Podsiadlo (2008); Stachowiak y Podsiadlo (1998, 2001, 2006); Stachowiak y Stachowiak (2001); De Pellegrin y Stachowiak (2004); Leavers (2000), Raadnui (2005); entre otros, han venido publicando diferentes investigaciones y modelos para determinar al grado de angulosidad de las partículas y su relación con el desgaste.

Hamblin y Stachowiak (1995), modelaron inicialmente el desgaste con un número de partículas artificiales que mostraron una correlación teórica con la abrasividad. Luego la abrasividad de cuatro abrasivos típicos de origen mineral fue caracterizada y correlacionada con experimentos de desgaste a dos y tres cuerpos. La abrasividad de partículas artificiales y reales fue caracterizada empleando dimensiones fractales (vía gráficas de Richardson), relación de aspecto, factor de cambio de forma y por el reciente método del "parámetro de angulosidad". Se encontró que el factor de cambio de forma y el método del parámetro de angulosidad correlacionó bien con las cantidades de desgaste a dos cuerpos. También determinaron que las pruebas de desgaste a tres cuerpos se correlaciona adecuadamente si las cantidades de desgaste se normalizan con respecto a la densidad de partículas.

La forma de las partículas (morfología), tiene un alto nivel de correlación con el cantidad

de desgaste de una superficie determinada, como más adelante se detallará (Hamblin y Stachowiak, 1995; Kelly y Hutching, 2001; Swanson, 1993).

Factores del suelo que más influyen en el desgaste de las herramientas agrícolas

Es importante considerar la textura (tamaño, forma, dureza y cantidad de partículas) y el contenido de agua (Gill y Vanden Berg, 1968). Natsis *et al.* (2008) consideran además que otros factores del suelo que influyen en el desgaste de la herramienta de corte son: densidad y las propiedades mecánicas del suelo como la resistencia al corte y fragilidad.

Owsiak (1997) considera también tener presente los siguientes factores:

- Tipo de suelo
- Grado de compactación, lo cual está influenciado por complejas propiedades físico-mecánicas del suelo (porosidad, densidad, índice de cono), las cuales cambian los resultados de la compactación

El sistema suelo agrícola – herramienta tiene sus propias características de desgaste, que difiere de otros tipos de sistemas, por la razón que es posible interactuar con suelos de varios tipos de texturas, humedad y otros impredecibles factores del campo (Karoonboonyanan *et al.*, 2007).

En suelos secos muy abrasivos de Australia el desgaste de herramientas tipo cincel es 4,25 veces más alto que en la mayoría de los suelos húmedos. Los contenidos de piedras y gravas son de los factores más importantes para el desgaste de herramientas para preparar el terreno (Ferguson *et al.*, 1998).

El contenido de piedras en el suelo, el tipo, resistencia y tamaño de partículas abrasivas y piedras fueron consideradas por Moore (1975) como los factores del suelo que más influyen en el desgaste.

Se considera que en los anteriores factores se encuentran expresados la gran mayoría de las propiedades del suelo que influyen de manera directa en el desgaste de las herramientas de tipo agrícola; ninguno de los autores citados menciona las fuerzas de cohesión y de fricción del suelo, pero el resultado de estas fuerzas depende de muchos factores ya mencionados (humedad, resistencia al corte, textura, tipo de partículas abrasivas, etc.)

En los análisis de desgaste de las herramientas agrícolas ocasionados por los suelos agrícolas se debe tener presente también el contenido de materia orgánica, pero desde el punto de vista de la posible acción lubricante. A manera de hipótesis se considera que al incrementarse el contenido de materia orgánica, la abrasividad del suelo debe disminuir.

Los factores impredecibles mencionados por Karoonboonyanan *et al.* (2007) pueden ser los bloques, piedra, raíces y otros posibles elementos que algunas veces tienen presencia súbita en determinado tipo de suelo, pero que pueden causar esfuerzos elevados que aceleran el deterioro de las herramientas por desgaste (posiblemente con mayor influencia en los arados rotatorios).

Hutchings (1992), afirmó en relación al tamaño de las partículas abrasivas, que se ha observado que partículas mayores llevan a pérdidas de masa más grandes, hasta que se llega a un tamaño a partir del cual no hay variaciones significativas. Y que una gran cantidad de resultados experimentales apuntan al valor de 100 μm como el tamaño en el cual ocurre esta transición. Es posible según lo anterior que lo que más incidencia tenga en el desgaste, sea la cantidad, geometría y dureza de las partículas abrasivas en un determinado volumen de suelo, y no sus dimensiones (luego de superarse las 100 μm). Esto explicaría el por qué Ferguson *et al.* (1998) y Moore (1975) obtuvieron valores altos de desgaste en suelos con considerable cantidad de piedras y gravas.

Otro factor de gran importancia (que ninguno de los autores desconoce), es la humedad del suelo. Reológicamente un suelo seco es muy diferente a ese mismo tipo de suelo pero en estado húmedo, presentándose considerables variaciones de sus propiedades tribológicas a medida que cambia su contenido de agua.

Finalmente se considera que algunas propiedades mencionadas por los autores están de alguna manera relacionadas, y para algunos casos al determinar una de ellas es posible encontrar otras propiedades (por ejemplo, debe existir una alta correlación entre los valores del índice de cono, densidad de un suelo, su grado de compactación, su porcentaje de porosidad, su resistencia al corte, entre otras). Con esta afirmación no se desconoce la necesidad que muchas de estas propiedades deban ser determinadas mediante pruebas de laboratorio o analíticamente.

1.6 Granulometría del suelo

El sistema unificado clasifica los suelos en tres grupos principales: de grano grueso, de grano fino, y altamente orgánico (suelo – turbas). Los suelos altamente orgánicos (Pt) se reconocen fácilmente por tener agregados fibrosos de fragmentos macroscópicos y microscópicos de materia orgánica descompuesta (Arango, 1989).

Solamente en los suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución de tamaños puede revelar algo referente a las propiedades físicas del material; por ejemplo los suelos gruesos bien gradados contienen una alta gama de tamaños. Hasta el límite entre arenas y limos se puede realizar la separación por mallas, para material particulado menor generalmente se emplea el método del hidrómetro (Arango, 1989).

La cantidad de desgaste puede ser estimada del porcentaje relativo de minerales, con diferente clase de dureza (escala de Mohs), tamaño, forma, elongación y orientación de las partículas; también por las propiedades direccionales, tipos de uniones, microestructura y poros de las partículas. Para clasificar las partículas y agregados de diferente tamaño (ver Tabla 1-1), se pueden utilizar técnicas de microscopía y para partículas más pequeñas técnicas de difracción de rayos X (DRX), que se pueden complementar con análisis térmico diferencial (DTA) (Nilsen *et al.*, 2007).

En relación al tamaño de las partículas abrasivas, por otro lado, se ha observado que partículas mayores llevan a pérdidas de masa más grandes, hasta que se llega a un tamaño a partir del cual no hay variaciones significativas. Una gran cantidad de

resultados experimentales apuntan al valor de 100 μm como el tamaño en el cual ocurre esta transición (Hutchings, 1992).

Respecto a lo anterior, Natsis *et al.* (2008) reportó a Furthermore (1972) quien experimentó con partículas con diámetros mayores a los reportados por Hutchings (1992), encontrando que partículas con diámetro de 0,45 a 0,75 mm causaron de dos a tres veces más desgaste que partículas entre 1,0 a 1,5 mm contradiciendo en parte lo afirmado por Hutchings, al encontrar puntos de descenso en la curva desgaste vs. tamaño de las partículas. Una posible explicación por parte del autor, es que las partículas de menos de 0,75 mm generan mayor cantidad de ranuras sobre la superficie.

Como complemento de lo anterior, se tiene el trabajo de investigación de Kelly y Hutching (2001), quienes utilizaron diferentes partículas abrasivas de sílice, dragonita y calcita, con tamaños promedio entre 2,39 – 150 μm ; no encontraron significativos efectos del tamaño de las partículas en el desgaste. Los mayores efectos se le atribuyeron a la forma (angulosidad) de las partículas.

En un suelo tipo agrícola se presenta una gran variación de tamaños de partículas (ver Tabla 1-1), por lo que es posible determinar los porcentajes de cada rango de tamaños.

Tabla 1-1: Granulometría de un suelo agrícola (USDA, 2004).

Granulometría del suelo (USDA)		Rango de tamaños (mm)
Bloque		600 >
Piedra		250 - 600
Grava		75 - 250
Gravilla		2 - 75
Arenas	Muy gruesa	1 - 2
	Gruesa	0,5 – 1
	Media	0,25 – 0,5
	Fina	0,1 – 0,25
	Muy fina	0,05 – 0,1
Limos	Grueso	0,02 - 0,05
	Fino	0,002 – 0,005
Arcilla		< 0,002

1.7 Morfología de las partículas

La forma de las partículas (angulosidad) puede servir para identificar y clasificarlas en relación con el proceso de desgaste. Por lo tanto, hay una necesidad de establecer los descriptores de forma cuantitativa que pueden utilizarse para distinguir entre diferentes tipos de partículas. Simples métodos se han propuesto para la caracterización de partículas de desgaste, por ejemplo: volumen, perpendicularidad, relación de alargamiento, relación de aspecto y factor de redondez. El factor de redondez, o circularidad, describe la proximidad a una forma circular. Un método común para determinar el factor de redondez es encontrar la relación del perímetro al cuadrado al área transversal de la partícula. Sin embargo, estos factores de forma simple, sólo proporcionan distinciones parciales entre diferentes tipos de partículas, un análisis más

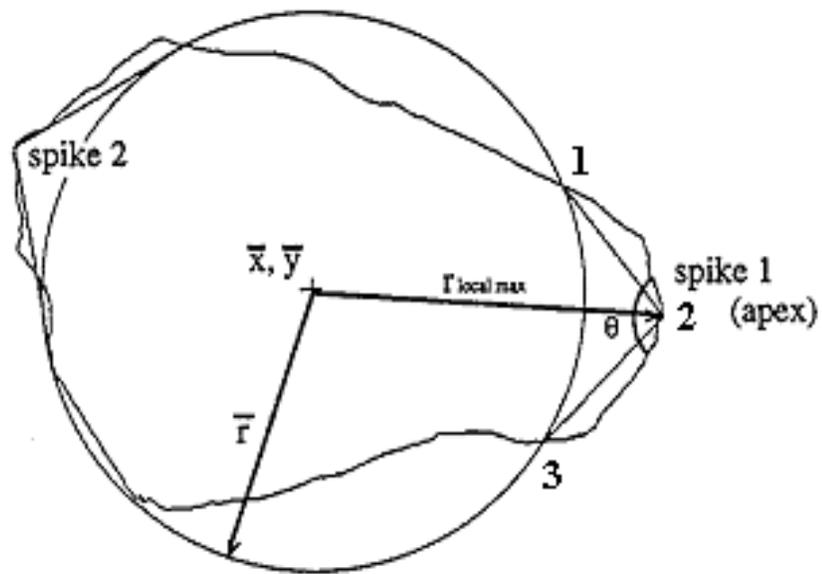
detallado de la forma es obligatorio. Estos incluyen la determinación de las características del borde en detalle y atributos de textura superficial (Raadnui, 2005).

Stachowiak (2000) para clasificar la morfología (angulosidad) de las partículas sugieren emplear el método SPQ (spike parameter-quadratic fit) en el cual se localiza mediante un *software* el centroide de las partículas y se traza una circunferencia con un área equivalente al área de la partícula (ver Figura 1-10). Luego se determinan las protuberancias (*spike*) de interés (aquellas que quedan fuera del círculo) y luego entre "1- 2" y "2 - 1", se halla funciones polinómicas de segundo grado, que se aproximen a la forma real de la partícula, y luego en el punto extremo mp se trazan tangentes a las dos funciones polinómicas, determinándose el ángulo θ respectivo; éste mismo procedimiento se repite con todas las protuberancias encontradas, finalmente se determina el sv (spike value), donde el SPQ es el valor promedio de todas las protuberancias, ecuación (1.3).

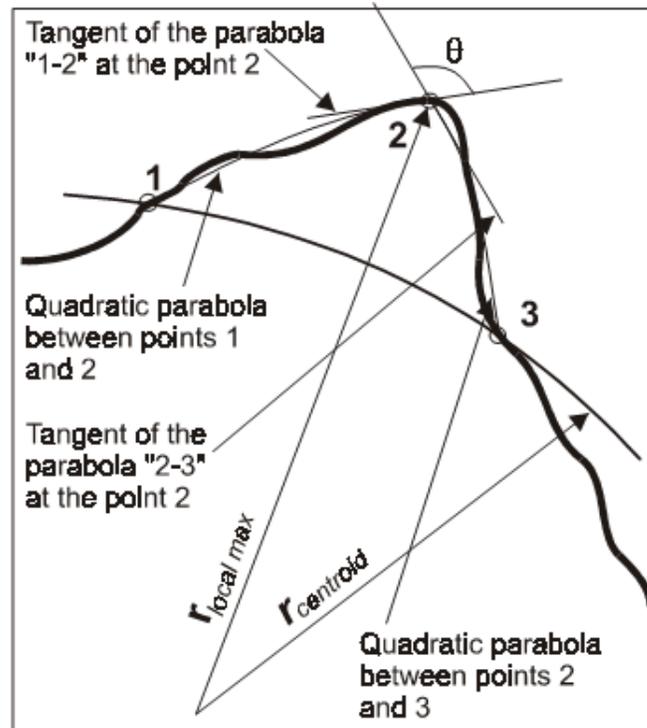
$$sv = \cos \theta/2$$

$$SPQ = sv \text{ promedio} \quad (1.3)$$

Figura 1-10: (a) Partícula con dos salientes (*spikes*), y circunferencia equivalente al área de la partícula (Stachowiak, 2000). (b) Método de cálculo SPQ basado en trazo de curvas cuadráticas trazadas en los salientes de la partícula (Mikli *et al.*, 2001).



(a)



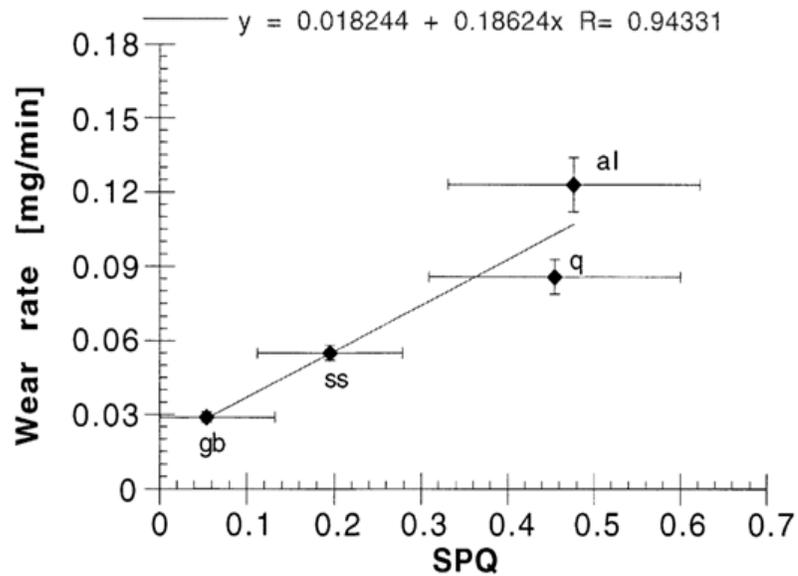
(b)

Swanson (1993) experimentalmente demostró el grado de abrasividad de las partículas con mayor angulosidad. Trabajó con feldespato triturado que presentó mayores valores de abrasividad que las partículas redondeadas de cuarzo (que tenían mayores niveles de dureza).

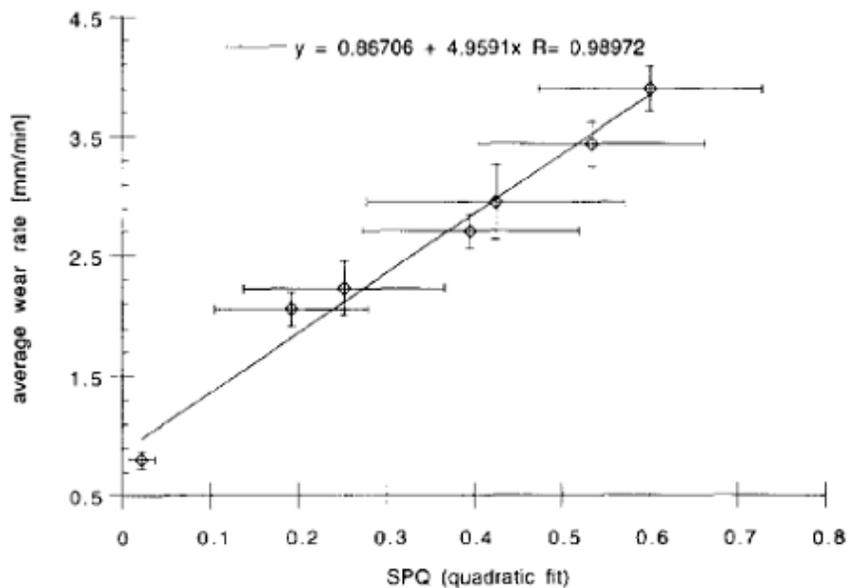
Con relación a lo anterior se concluye que, aunque el tamaño y la dureza tienen efecto en la abrasividad de las partículas (Hamblin y Stachowiak ,1995), la curvatura de las partículas (angulosidad) tiene un alto nivel de correlación con la cantidad de desgaste de una superficie determinada.

En la Figura 1-11 se observa el resultado de los experimentos obtenidos por Stachowiak y Stachowiak (2001), al medir la cantidad de desgaste a tres cuerpos obtenido con incremento en el factor SPQ (los resultados los aproximan a una ecuación carácter lineal). En sus experimentos utilizaron el tribómetro *ball on plate*.

Figura 1-11: (a) Desgaste a tres cuerpos en tribómetro *ball on plate* vs. SPQ (Spike quadratic parameter), donde: gb (partículas de vidrio), ss (arena de sílice), q (cuarzo), al (alumina) (Stachowiak y Stachowiak, 2001). (b) Desgaste a dos cuerpos (pin on disc) (Hamblin y Stachowiak, 1995).



(a)

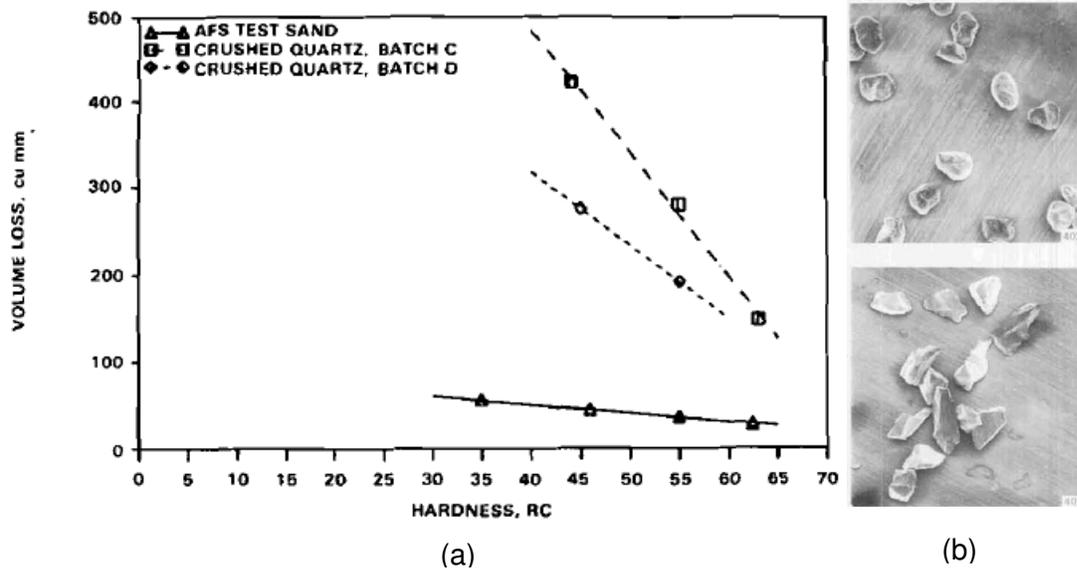


(b)

La Figura 1-12 corresponde a otro trabajo investigativo donde se correlaciona el desgaste, el cambio de dureza del metal y la morfología de las partículas abrasivas

(Swanson y Vetter, 1985). Obsérvese que la mayor cantidad de desgaste se presenta al utilizar partículas de cuarzo triturado (con mayor grado de angulosidad que las partículas de arena AFS). Se destaca también la linealidad de las graficas de desgaste obtenidas y la presencia de dos tipos de cuarzo, correspondientes a dos baches diferentes (C y D).

Figura 1-12: (a) Efecto de la morfología de las partículas en el desgaste del acero 1080 tratado térmicamente, a diferente nivel de dureza del metal (b) Morfología de las partículas: arriba, con arena seca de granulometría AFS 50/70; abajo, abrasivo de cuarzo triturado. (Swanson y Vetter, 1985).



1.8 Dureza de las partículas de suelo

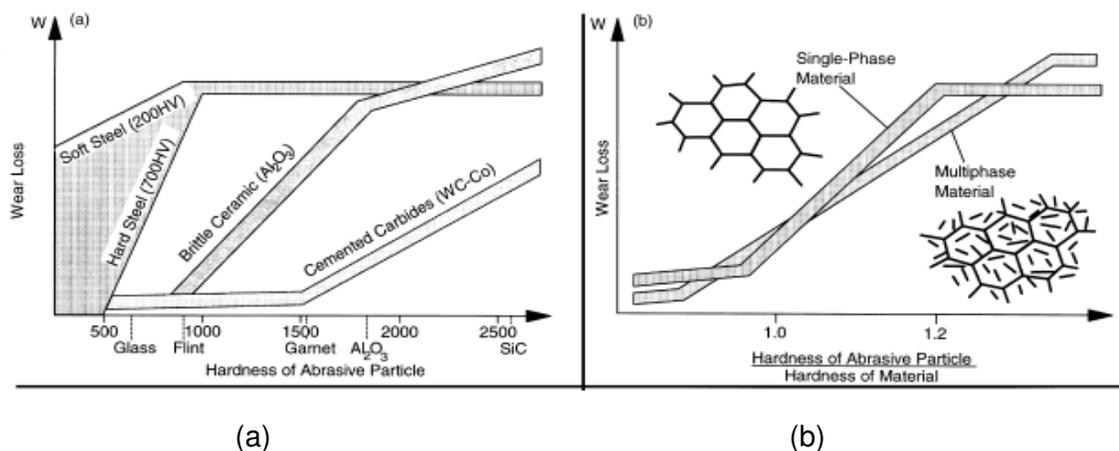
En lo que concierne a las características del abrasivo, se ha encontrado en numerosas experiencias que cuando la relación de durezas entre metal y abrasivo (H_m/H_a) es superior al valor de 1,2 el régimen de desgaste pasa de una condición moderada a severa, con incidencia acentuada del mecanismo de microcorte (Torrance, 1981).

Con el incremento de la dureza de las partículas abrasivas, las pérdidas por desgaste se incrementan aproximadamente en dos órdenes de magnitud pasando de niveles de bajo desgaste, a niveles de alto desgaste (Figura 1-13a). Esta transición depende de la relación de durezas de las partículas abrasivas y las del material desgastado (Figura 1-13b), y más específicamente depende de las fases del material, y del nivel de fragilidad o ductilidad.

Moore (1975) comenta que uno de los más significantes aportes de Richardson fue encontrar que el volumen de desgaste de un material decrece rápidamente cuando la relación dureza del material (H_m) a dureza del abrasivo (H_a) excede el valor de 0,85.

En conclusión, será fundamental determinar los valores de dureza del material y de los abrasivos presentes en el suelo (encontrando la relación H_m/H_a , para cada suelo estudiado), y hallar las correlaciones que se presenten entre ambos.

Figura 1-13: Representación esquemática de pérdidas de desgaste por partículas duras en función de las propiedades del material y parámetros operacionales como: (a) dureza de las partículas abrasivas; (b) relación de dureza del abrasivo y del material. (Zum Gahr, K., 1998).



En la Tabla 1-2 se observan los tipos de minerales más comunes presentes en suelos agrícolas y su dureza en escala Mohs y en kgf/mm^2 .

Tabla 1-2: Dureza de minerales presentes frecuentemente en suelos agrícolas (Serverdev, 1984).

Roca o mineral	Escala Mohs	Microdureza (kgf/mm^2)
Cuarzo	7,0	1050 - 1130
Feldespatos	6,0 - 6,5	695 - 720
Granito	6,0 - 7,0	820
Granate	6,5 - 7,5	750 - 900
Epidote	6,5	720
Hornblende	5,5 - 6,0	650
Moscovita	2,0 - 3,0	---
Biotita	2,5 - 3,5	---
Minerales arcillosos	1,0 - 2,5	---

1.9 Materia orgánica (MO)

La MO humificada del horizonte A de los suelos tiene en promedio un 58 % de carbono. Este porcentaje es bastante estable por lo que comúnmente es indistinto hablar de materia orgánica humificada o carbono del humus, siendo el humus la casi totalidad de la MO (Álvarez 2005).

De acuerdo a Ibáñez *et al.* (2004) un contenido común de MO para muchos suelos es de aproximadamente 5% (ver en la Tabla 1-3 las cinco clases de suelos según el contenido de MO).

Tabla 1-3: Clases de suelos según contenido de MO (Ibáñez *et al.*, 2006).

Clase	% de MOS	Descripción
1	≤2	Bajo
2	>2 – 4	Medio
3	>4 – 8	Alto
4	>8 – 15	Muy alto
5	> 15	Extremadamente alto

1.10 Factores dinámicos en la tracción de herramientas agrícolas

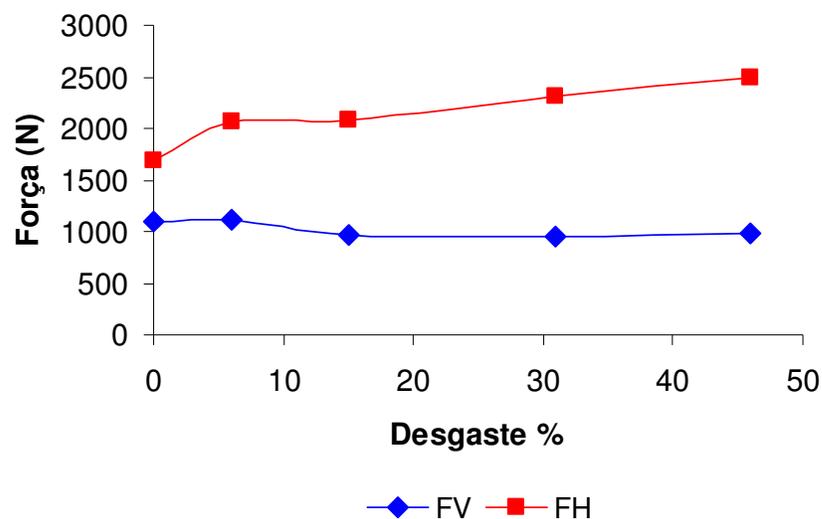
Para el caso específico de una herramienta de labranza, se tendrá una cantidad de desgaste lineal a medida que se incremente la carga, la carga se puede incrementar de varias maneras: cambio en las propiedades físicas o mecánicas del suelo (textura, humedad, densidad, etc.), modificando la velocidad de trabajo o profundidad de trabajo. Por lo que se deberá tener muy presente los factores que inducen al incremento de la carga, para formular las hipótesis que relacionen el desgaste con la carga y la velocidad.

En Brasil Spagnolo *et al.* (2006), relacionaron específicamente el desgaste con las fuerzas verticales y horizontales en los surcadores tipo puntas de una sembradora con 9 líneas espaciadas 0,45 m. Para el estudio seleccionaron cuatro de las líneas de la máquina, trabajando a una profundidad media de 0,12 m. En la Tabla 1-4 y Figura 1-14 se observa que la fuerza vertical, que opera en los surcadores, se mantuvo prácticamente constante, sin aportar una variación significativa, y disminuyó ligeramente con el aumento de desgaste de la herramienta, alcanzando un pico alrededor de un 11% cuando se produjo un desgaste de la herramienta en un 46%. Este hecho (disminución de fuerza vertical), dio lugar a dificultades tanto en la penetración de la herramienta en el suelo, como en el mantenimiento de la profundidad de trabajo, dificultad que fue solucionada mediante un mecanismo que mantenía la profundidad de sembradora de manera constante durante todo el trabajo realizado. Sobre la fuerza horizontal, componente principal del esfuerzo de tracción, se presentó una tendencia a aumentar con el surcador más desgastado. En promedio aumentó 46%, presentando diferencias significativas a partir del momento en que la herramienta alcanzó el 15% de desgaste.

Tabla 1-4: Fuerzas verticales (FV) y horizontales (FH) actuantes sobre la herramienta en función de las diferentes tasas de desgaste (Spagnolo *et al.*, 2006).

Desgaste (%)	FV (N)	FH (N)
0	1101,4	1682,6
6	1107,5	2066,3
15	971,8	2089,9
31	959,0	2309,7
46	990,4	2500,0

Figura 1-14: Fuerzas verticales (FV) y horizontales (FH) en función del desgaste de la herramienta de la surcadora (Spagnolo *et al.*, 2006).

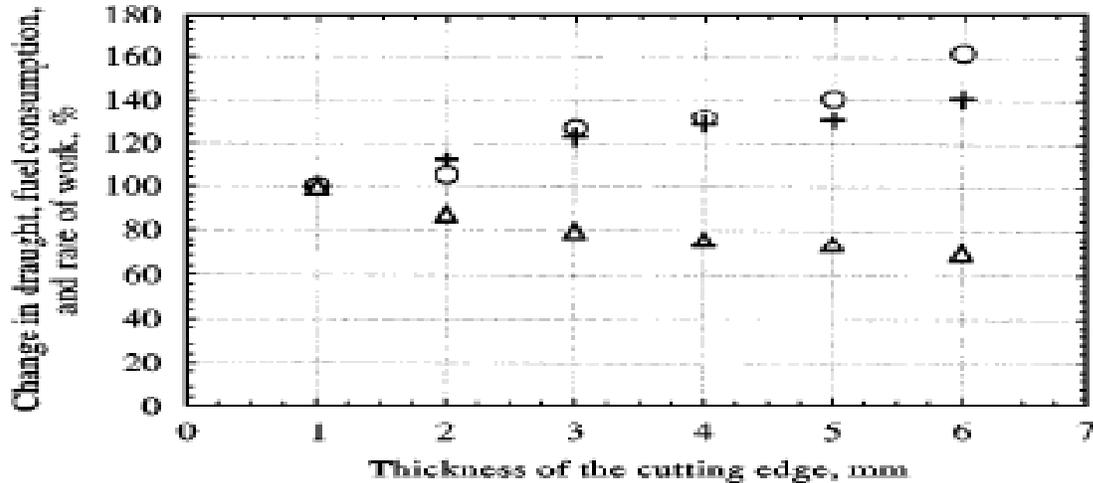


Los anteriores resultados fueron similares a los obtenidos por Fielk (1996), que reportó con base en experimentos de campo que la fuerza de tiro de una herramienta de labranza desgastada aumentó considerablemente en relación con una herramienta nueva, mientras que la fuerza vertical se modificó, dificultando la penetración de la herramienta en el suelo.

Finalmente es de interés mostrar parte de la investigación de Natsis *et al.* (1999), quienes correlacionaron la fuerza de tiro, el consumo de combustible y la cantidad de suelo trabajado, con el espesor de las cuchillas; La Figura 1-15 muestra que al aumentar el espesor de la cuchilla de corte, la fuerza de tiro y el consumo de combustible se incrementan considerablemente, mientras que la cantidad de suelo trabajado decrece. La fuerza de tiro se incrementa más de un 60 % cuando el espesor de la cuchilla se incrementa de 1 a 6 mm. Cuando el espesor de la cuchilla de corte se incrementa hasta 6

mm, el consumo de combustible aumenta en un 41% y la cantidad de suelo trabajado decrece en un 30 %.

Figura 1-15: Influencia de el espesor del filo de corte de la cuchilla, en la fuerza de tiro (O), el consumo de combustible del tractor (+) y la cantidad de suelo trabajado (Δ) para un suelo arcilloso (todos los valores fueron expresados en porcentaje respecto al valor inicial de 100% observado para un espesor de 1 mm) (Natsis *et al.*, 1999).



1.11 Ecuaciones dimensionales y teorema PI (Murphy, 1950)

De manera general una ecuación dimensional puede tener la estructura presentada en la ecuación (1.4).

$$A = F^{c_1} L^{c_2} T^{c_3} \quad (1.4)$$

Donde,

A: variable dependiente
 F, L, T: variables primarias
 c1, c2 y c3: exponentes

La relación general entre α y las cantidades primarias se expresa en la ecuación (1.5).

$$\alpha = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \quad (1.5)$$

Donde n expresa el número total de grupos adimensionales que afectan el fenómeno.

Por ejemplo, la variable dependiente puede ser la potencia de un motor, y las variables primarias el diámetro, la carrera, frecuencia, consumo de combustible, etc. El problema sería establecer la naturaleza de la función.

Murphy (1950) demostró que la ecuación (1.5) se puede expresar como la ecuación (1.6).

$$\alpha = C_{\alpha} a_1^{c_1} a_2^{c_2} a_3^{c_3} \dots a_n^{c_n} \quad (1.6)$$

La ecuación (1.6) coincide con la ecuación (1.4), e indica que la cantidad secundaria es expresada como un coeficiente adimensional de C_{α} multiplicado por el producto de las cantidades primarias pertinentes.

De acuerdo a lo anterior, de (1.6) se puede llegar a la ecuación (1.7).

$$1 = C_{\alpha} a_1^{c_1} a_2^{c_2} a_3^{c_3} \dots a_n^{c_n} \quad (1.7)$$

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del sitio experimental

La investigación se realizó en terrenos pertenecientes al Centro Agropecuario Cotové (vereda El Espinal del municipio de Santafé de Antioquia) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, localizado en las coordenadas geográficas 6°31'51''N y 75°49'45''O (Google, 2010; Figura 2-1). Se ubica en la zona de vida de bosque seco tropical (bs-T) y presenta las siguientes condiciones climáticas promedio anuales: temperatura de 27,3 °C, humedad relativa de 55,38%, precipitación de 1919,6 mm (Arango, 2004). Con un GPS map 60CSX (Marca Garmin) se determinó la altura para el Centro Agropecuario: 503± 1 m.s.n.m. Se eligió un lote experimental de 0,573 ha, completamente mecanizable, con pendiente media menor del 3% y suelos de textura media a pesada, moderadamente profundos y con buen nivel de fertilidad, los cuales se han derivado de aluviones y se han clasificado como Vertic Haplustalfs (Vallejo y Camargo, 1998).

El área experimental se utilizó hasta el año 2006, y por 30 años, para hacer prácticas demostrativas de labranza (en promedio una práctica por semestre) y antes de realizar este trabajo se encontraba con pasto ángleton (*Dichanthium aristatum* (Poir) C. E. Hubbard), utilizado para producir forraje (Figura 2-1).

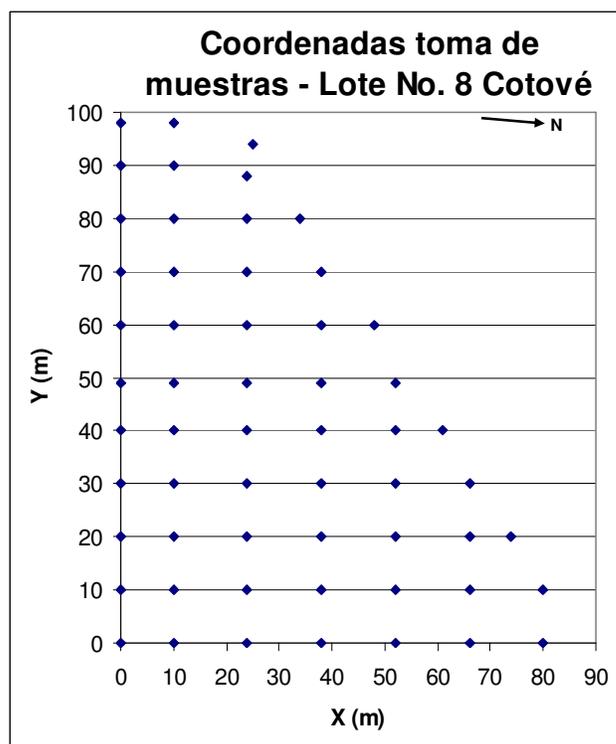
Figura 2-1: Lote experimental en Cotové (Google, 2010).



2.2 Preparación del lote experimental, muestreo y propiedades del suelo evaluadas

De acuerdo con la metodología reportada por Arango (2004), en el lote se materializó una cuadrícula regular (malla) con dimensiones aproximadas de 10 m x 12 m (Figura 2-2). La malla se georreferenció con un sistema de coordenadas planas (x, y) de origen arbitrario.

Figura 2-2: Diseño de la cuadrícula para el muestreo.



En cada intercepto de la malla se hizo una minicalicata de 200 x 200 x 150 mm y se tomó una muestra de suelo, sin disturbar, con un cilindro metálico de 96,21 cm³, para determinar densidad aparente, y otra disturbada de aproximadamente 2500 g, para llevar a cabo las demás determinaciones. La profundidad para la toma de la muestra estuvo comprendida entre 150 mm y 200 mm (Figura 2-3). Todos los análisis se realizaron con muestras secadas al aire y tamizadas a 2 mm, excepto los análisis de granulometría.

Se determinaron las siguientes propiedades físicas y mecánicas de los suelos, con los métodos que se exponen y que se encuentran descritos en Motta *et al.* (1990), IGAC (2006) y Jaramillo (2011): densidad aparente (D_a), con el cilindro biselado (Figura 2-3b), humedad gravimétrica de las muestras en campo (W), coeficiente higroscópico (CH), humedad del suelo a capacidad de campo (CC), humedad del suelo en el límite de soltura (LS), contenido de materia orgánica del suelo por Walkley-Black (MO), granulometría completa del suelo y morfología, tipo y dureza de las partículas gruesas

(se detallan más adelante). La Da se expresó en $N.m^{-3}$ o $Mg.m^{-3}$ y las humedades y la MO en m^3 o %.

Figura 2-3: Toma de muestras de suelo en el lote de Cotové. (a) Disturbadas para la mayoría de las determinaciones en el Laboratorio de Suelos. (b) Sin disturbar para determinar Da.



(a)

(b)

2.2.1 Análisis granulométrico del suelo

Con una parte de la muestra disturbada del suelo se determinó la distribución de las diferentes partículas del mismo mediante tamizado en agua, agrupándolas en: gravas (Gv: con diámetro entre 75 y 250 mm), gravilla gruesa (Gg: diámetro entre 20 y 75 mm), gravilla media (Gm: diámetro entre 5 y 20 mm), gravilla fina (Gf: diámetro entre 2 y 5 mm), arena muy gruesa (Amg: diámetro entre 1,19 y 2 mm), arena gruesa (Ag: diámetro entre 0,5 y 1,19 mm), arena media (Am: diámetro entre 0,25 y 0,5 mm), arena fina (Af: diámetro entre 0,15 y 0,25 mm) y arena muy fina (Amf: diámetro entre 0,05 y 0,15 mm), Con el hidrómetro se determinaron los contenidos de limo (L: diámetro entre 0,05 y 0,02 mm) y de arcilla (Ar: diámetro < 0,002 mm). Se expresó el contenido de cada fracción como porcentaje, en peso seco, del total de la muestra tamizada. Los análisis descritos hasta aquí se llevaron a cabo en los Laboratorios de Suelos (Facultad de Ciencias) y de Riegos y Drenajes (Facultad de Ciencias Agropecuarias) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

2.2.2 Morfología de partículas gruesas del suelo

Se determinó la morfología de las gravillas con diámetro entre 2 y 5 mm, de acuerdo a metodología seguida por Stachowiak (1998), por ser el grupo de fragmentos de roca con presencia en todos los 57 puntos muestreados. Se tomó una muestra entre 20 y 30 partículas por sitio para determinar el parámetro correspondiente a la morfología de la

partículas de suelo por dos métodos: el de Stachowiak (2000), denominado Spike Parameter-Quadratic Fit (*SPQ*) (ver numeral 1.7), y un método propuesto en la presente investigación, denominado “relación de perímetros de partículas” (*RP*).

Las partículas se colocaron en un papel blanco (Figura 2-4a) y se fotografiaron con una cámara digital marca SONY, modelo DSC - S930, de 10,1 megapíxeles, ubicada en un soporte localizado a 335 mm de altura sobre la muestra.

Con el programa “*Angulosidad*” (ver Anexo A), que operó bajo ambiente Matlab, se transformó cada imagen de partículas en una imagen binaria (negro y blanco, Figura 2-4b), y luego se determinaron el *RP* y *SPQ* promedios de grupos de partículas del suelo en cada sitio.

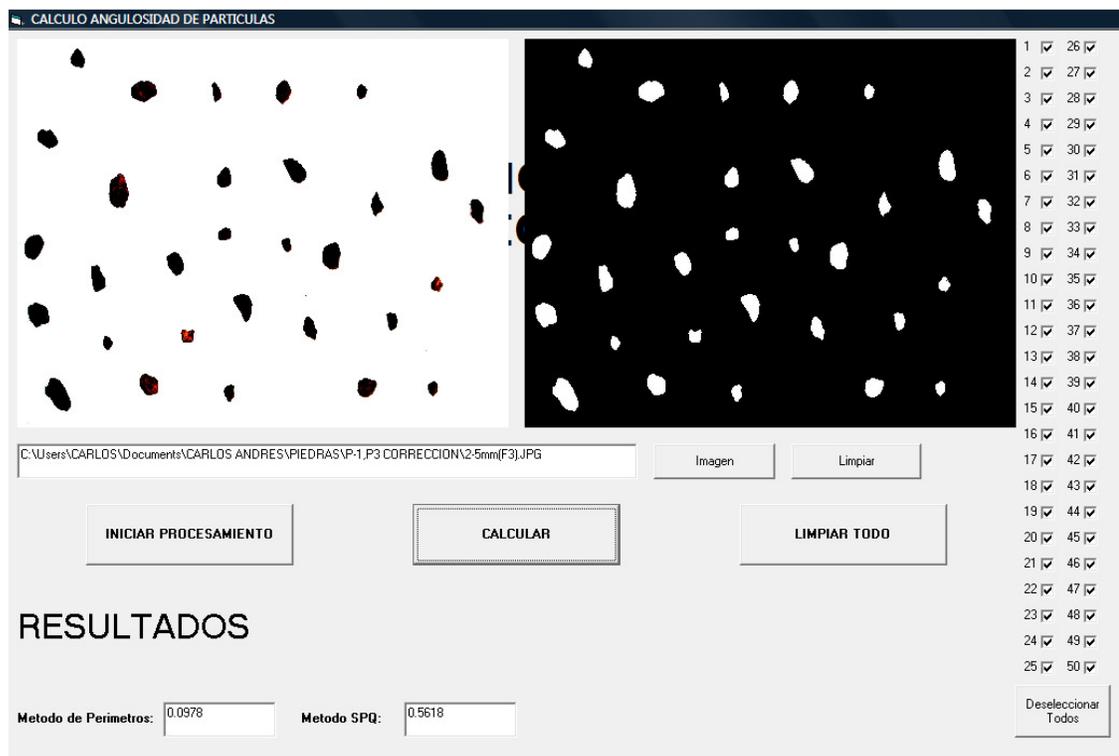
El método *SPQ* se ilustra en el numeral 1.7. En el método *RP* se midió, para una partícula determinada, el área proyectada de la partícula (*A*), el perímetro de la partícula (*P1*) y el perímetro equivalente a una circunferencia con área igual al área proyectada (*P2*). La morfología de un grupo de partículas se determinó con la ecuación (2.1).

$$RP = (P1 - P2)/P1 \quad (2.1)$$

Figura 2-4: Método para determinar la morfología de las gravillas. a) Fotografía de las partículas. b) Imagen procesada de las partículas en forma binaria por el programa *angulosidad*.



(a)



(b)

2.2.3 Dureza de las partículas

Mediante la observación en estéreomicroscopio de 20 a 30 partículas de suelo (gravillas), seleccionadas al azar, se determinó la composición de ellas y se estimó la cantidad que había de cada una, en porcentaje, en la muestra. Con la composición establecida se determinó la dureza de las gravillas con base en la dureza de los minerales y/o rocas que las componían, tomando ésta de tablas ya publicadas (Konta, 2009; Bio- architettura, 2011; GLY, 2011; Vidoni, 2011; NETTOPDF, 2011; Algouti y Algouti, 2011; Beste y Jacobson, 2003; Szwedzicki, 1998; Winkler, 1994; Bamford *et al.*, 1977;). Esta tarea se realizó en el Laboratorio de Mineralogía (Facultad de Minas) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Como la mayoría de los reportes de dureza de minerales se expresaron en escala Mohs, se procedió a transformar la dureza a unidades de $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$, con base en conversiones recomendadas por Winkler (1994).

2.3 Análisis de variabilidad espacial de propiedades del suelo

La parte experimental de este trabajo tiene varias etapas y en cada una de ellas se llevaron a cabo diferentes procesamientos estadísticos. En esta etapa, con la información

de suelos recolectada en la malla regular, se hacen análisis exploratorios de los datos, análisis de tendencia espacial y análisis de semivariografía (Jaramillo, 2011).

2.3.1 Análisis exploratorios

Se hicieron análisis exploratorios de los datos de cada variable para establecer la representatividad de éstos, sus propiedades, caracterizar su distribución, detectar inconsistencias en la información y/o posibles valores anómalos. Los datos se caracterizaron con los estadísticos: media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, valores máximo y mínimo, simetría y normalidad (estadístico de Shapiro-Wilk: si $p > 0,05$, la distribución es normal).

2.3.2 Análisis de tendencia espacial

Se hace fundamentalmente para confirmar el supuesto de estacionaridad de los datos. Se confirma que los datos no tengan una distribución diferencial en el campo controlada por su ubicación dentro del mismo. Se llevó a cabo un análisis de tendencia espacial mediante un modelo de regresión múltiple del estilo de la ecuación (2.2) (Diggle y Ribeiro, 2007).

$$\text{Variable} = a + bx + cy + d(xy) + e(x^2) + f(y^2) \quad (2.2)$$

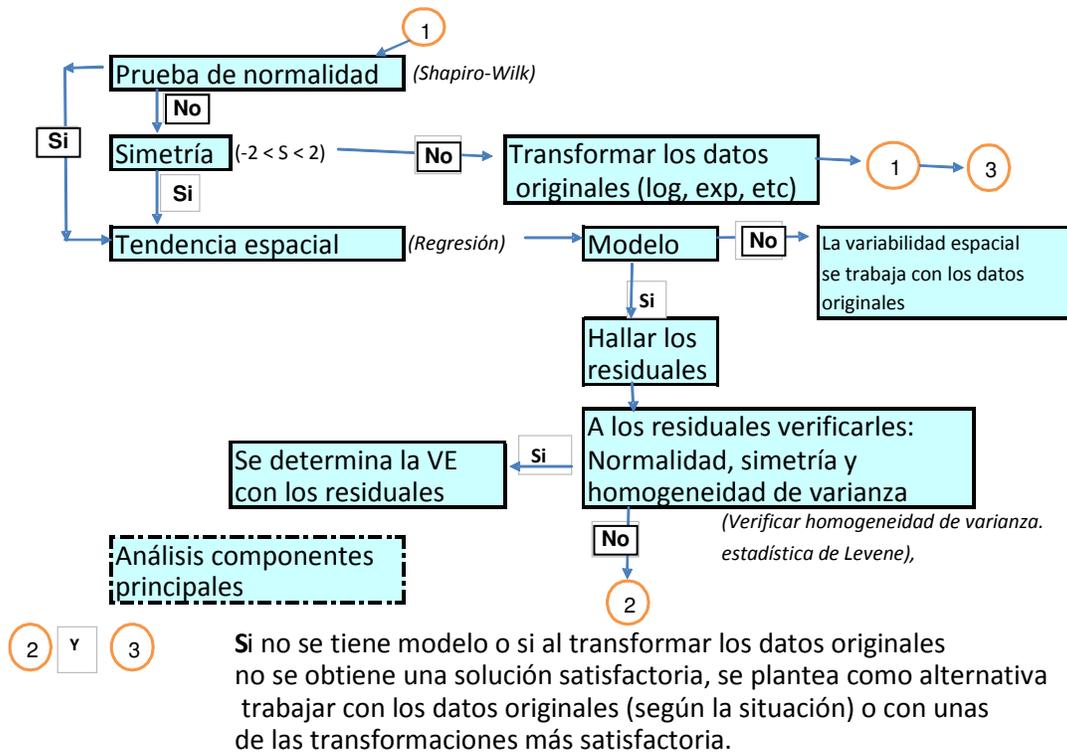
Donde (x, y) son las coordenadas de los puntos de muestreo en la malla y a, b, c, d, e, f , son coeficientes. Cuando se obtuvo un modelo de regresión significativo al 95 % y con un R^2 mayor de 20% (Kerry y Oliver, 2004) se procedió a confirmar los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza de los residuales de dicho modelo y, si estos supuestos se cumplían, se tomaban los residuales de la regresión para hacer los análisis de semivarianza; si no se presentaba modelo de regresión significativo, la semivariografía se hacía con los valores originales de la variable.

2.3.3 Análisis de semivariografía

A las propiedades del suelo que fueron seleccionadas en el procedimiento anterior se les hizo un análisis completo de semivariografía: se definió su modelo de semivariograma y se hizo el respectivo mapa mediante una interpolación con kriging puntual.

En caso de que la distribución de los datos (originales o residuales, según el caso) en alguna variable no fuera normal, se aceptó que por lo menos fuera simétrica y si esta condición tampoco se presentaba, se procedió a hacer una transformación logarítmica de los datos originales de la variable para ver si se lograba la normalización, o por lo menos, la simetrización de aquellos. En los casos donde se utilizaron los residuales, se volvió a hacer todo el proceso de análisis de tendencia con los datos transformados. Si con los procedimientos anteriores se corregía el problema, la semivariografía se hacía con los datos transformados o con los nuevos residuales (ver el flujograma del procedimiento completo ilustrado en la Figura 2-5).

Figura 2-5: Flujograma completo para determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas, mecánicas y estructurales del suelo.



Para las variables que presentaron dependencia espacial se realizó una interpolación con el método del kriging puntual y se elaboraron sus correspondientes mapas de isolíneas, con el fin de conocer el patrón que tiene su dependencia espacial (Lozano *et al.*, 2004). Todos los análisis de semivariografía se hicieron con el apoyo del programa GS+ 3.1.

Con esta información se tuvo criterios técnicos para definir el tamaño y orientación de las unidades experimentales en los que se hicieron los experimentos de laboreo con el objeto de verificar su correlación con los factores de abrasividad previamente seleccionados. Más específicamente, el lote se dividió en dos áreas con suelos diferentes (franco arcilloso y franco limoso), en cada suelo se definieron líneas experimentales variando la velocidad de trabajo (tres velocidades diferentes).

2.4 Experimentos de campo

El diseño de experimentos utilizado fue un modelo factorial 3 x 2, para un total de seis (6) tratamientos, con diez replicaciones por tratamiento. Los tratamientos correspondieron a dos tipos de suelos (franco arcilloso y franco limoso) y 3 velocidades de operación (2, 3 y 4 km/h).

Se utilizó un arado de cincel rígido marca Agroindustrial Apolo, trabajándose con uno de los vástagos. El arado se acopló a los tractores disponibles JD5705 y JD5500, con potencia en la volante de 85 hp y 80 hp, respectivamente.

Mediante un dinamómetro de aguja instalado entre los dos tractores (Figura 2-6), se midió la fuerza de tracción del arado a tres velocidades (2, 3 y 4 km/h), mediciones que se realizaron en cada uno de los suelos (franco arcilloso y franco limoso). Con el tractor de atrás se controló la profundidad de trabajo (motor encendido y en neutro), el otro tractor se utilizó para halar el conjunto tractor – equipo (previamente se determinó la potencia de resistencia al rodamiento, para cada suelo y día de trabajo). Durante cada experimento se fijaron dos puntos de referencia en la parcela, con el objeto de medir la velocidad promedio del equipo.

Figura 2-6: Dinamómetro instalado entre los dos tractores - arado de cincel operando con un solo vástago.



Los experimentos se realizaron durante 6 días no continuos (21, 23, 28 de septiembre y 5, 12 y 20 de octubre de 2010), con objeto de obtener condiciones de humedad y densidad del suelo diferentes. En cada uno de los días seleccionados se trabajó con una herramienta nueva, cada una trabajó 10 líneas experimentales de 28 m c/u (diez replicaciones) y espaciamiento entre ellas de $1,10 \pm 0,1$ m.

Para estimar la capacidad abrasiva del suelo se realizaron ensayos de campo empleando como probeta platinas de acero ASTM A36 (que interactuaron directamente con el suelo, por lo que se llamaran en adelante *herramientas*) instaladas sobre las puntas de arado de cincel (Figura 2-9; ver también en el Anexo I la justificación del uso de las platinas con base en ensayos preliminares de campo).

Estas herramientas, dado su peso inferior a la punta de cincel completa, fue apta para llevar a cabo mediciones precisas de desgaste, donde a cada herramientas se le registró el peso antes y después de roturar el suelo. Para estas tareas se utilizó balanza de precisión marca Shimadzu tipo UX4200H con resolución de 0,01 g y rango de operación de 4200 g.

Se delimitaron los dos tipos de suelos 1 y 2 (franco arcilloso y franco limoso) presentes en el lote No. 8 de Cotové. El trazado de las líneas experimentales se realizó con base

en el resultado del mapa kriging puntual de distribución de los residuales de limos (Figura 2-7).

Variables independientes no controlables: Densidad aparente (D_a); humedad gravimétrica del suelo (W); contenido de materia orgánica (MO); fragmentos de roca (FR) y tierra fina (T); morfología (M) y dureza de partículas de suelo (H_a); y potencia de trabajo (P).

Variables independientes controlables: velocidad de trabajo (tres niveles: 2, 3 y 4 km/h) y dos tipos de suelo (dos niveles: franco limoso y franco arcilloso) (ver combinación de variables independientes en la Tabla 2-1; la disposición de los tratamientos fue aleatorio).

Variable dependiente (variable respuesta): pérdida de peso de la herramienta (Y_h).

Tabla 2-1: Combinación de las variables independientes (controlables) del experimento

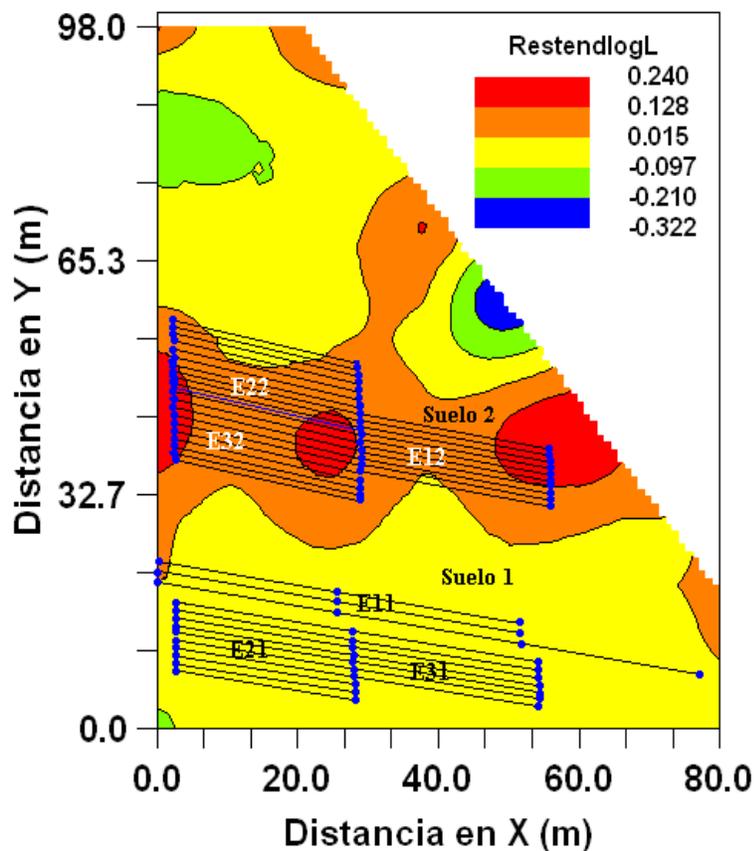
Tratamiento (E_{ij})	Velocidad (i)	Tipo de suelo (j)	Orden de los tratamientos
E11	1	1	6
E12	1	2	2
E21	2	1	4
E22	2	2	3
E31	3	1	1
E32	3	2	5

Sea el tratamiento E_{ij} , donde i : velocidad 1, 2, 3, que corresponde a 2, 3 y 4 km/h, respectivamente; j : tipo de suelo, 1 (franco arcilloso), 2 (franco limoso).

El número de líneas fue limitado por la cantidad posible de experimentos a realizar durante un día. Adicionalmente se consideró la hipótesis que podía presentarse variaciones significativas en las mediciones de W y D_a en horas diferentes de un mismo día (específicamente en experimentos realizados en la mañana y en la tarde). Por lo que se decidió realizar 5 líneas (en horas de la mañana), luego hacer un receso de una hora, para continuar con las restantes (en horas de la tarde). Las propiedades del suelo se determinaron al promediar el resultado de las mediciones al inicio y final de cada una de las líneas.

Se realizaron estadísticos básicos y análisis de varianza (ANOVA) para los datos de la línea y comparación entre líneas experimentales. El análisis estadístico se hizo con el programa Statgraphics 5.1 plus.

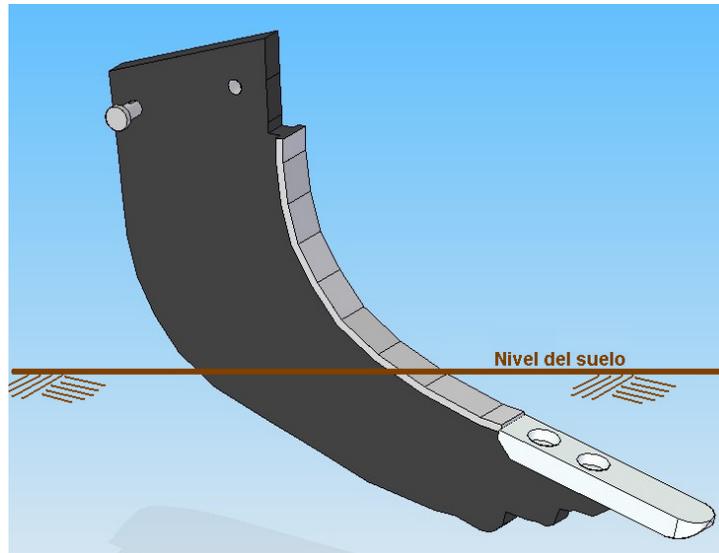
Figura 2-7: Mapa kriging de residuales de Log10 Limo (RestendlogL, %) y distribución de los tratamientos y líneas experimentales realizados en los dos suelos del lote de Cotové (las líneas punteadas delimitan de manera aproximada los dos tipos de suelos hallados en el lote de estudio).



W, Da, P y Yh fueron medidos antes o durante los experimentos de campo. T, FR y MO fueron interpolados con los mapas kriging puntual para cada línea experimental de acuerdo a las coordenadas del muestreo inicial del suelo. M y Ha fueron determinados en cada línea experimental de acuerdo al muestreo inicial de granulometría, donde a las muestras de suelo se les determinó M (con el programa angulosidad, por dos métodos: puntas o SPQ y perímetros o MP) y dureza de las partículas abrasivas (Ha, ver numeral 2.2.3) y luego se interpolaron con mapas kriging puntual de acuerdo a las coordenadas preestablecidas. Hm se determinó mediante medidas de laboratorio empleando el durómetro que se describe en la página siguiente. Luego se realizaron mapas kriging de cada propiedad y se extrapoló el resultado de cada dato de interés de acuerdo a la línea seleccionada, lo anterior se realizó con ayuda del programa GS+ y de la georreferenciación del lote en coordenadas (x,y). (Ver en Anexo B el procedimiento seguido para las gravillas utilizando los mapas kriging).

La herramienta se trabajó a un rango de profundidad de 300 ± 20 mm (hasta su extremo inferior) para todos los experimentos, obsérvese en la Figura 2-8 que la herramienta queda totalmente cubierta por el suelo, y la canillera interactúa con el suelo en la parte donde hay mayor contenido de materia orgánica. Durante los experimentos de campo, se hicieron algunos registros de pérdida de peso de la canillera.

Figura 2-8: Nivel del suelo respecto a la profundidad de trabajo de la herramienta de arado de cincel (ancho: 65 mm; profundidad máxima herramienta: 300 ± 20 mm; canillera, con profundidad máxima de trabajo de 100 mm y ancho de 35 mm.)

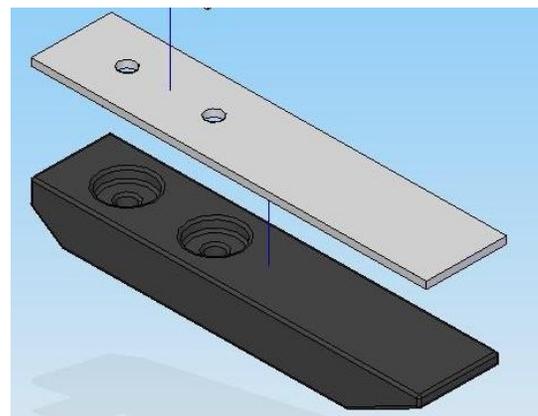


Antes de los ensayos de campo, a todas las herramientas se les determinaron sus dimensiones geométricas principales y dureza superficial empleándose el durómetro marca Wolpert en escala Rockwell B. Estas tareas se realizaron en los Laboratorios de Mecanización Agrícola y Caracterización de Materiales, ambos de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

Figura 2-9: (a) Arado de cincel. (b) Instalación de la herramienta sobre la punta de cincel.



(a)



(b)

Para transformar la dureza superficial de las herramientas en escala Rockwell B a escala

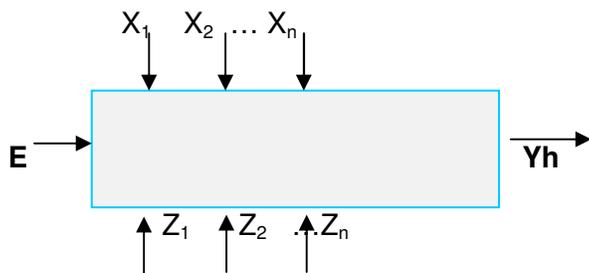
Vickers (kg/mm^2) se utilizó los valores de conversión propuestos por Davis (2002) para aceros no austeníticos (Tabla 2-2).

Tabla 2-2: Equivalencia aproximada entre dureza Rockwell B y Vickers para aceros no austeníticos (Davis, 2002)

Dureza Rockwell B No 100 kgf., HRB	Dureza Vickers No., HV
70	125
69	123
68	121
67	119
66	117
65	116
64	114
63	112
62	110
61	108
60	107

Resumen del diseño experimental

Modelo: factorial 3×2 , para un total de seis (6) tratamientos, con diez replicaciones por tratamiento. Los tratamientos correspondieron a dos tipos de suelos (franco arcilloso y franco limoso) y 3 velocidades de operación (2, 3 y 4 km/h).



Donde,

E (entradas): profundidad de trabajo (300 ± 20 mm); herramientas de acero A36 (cada tratamiento se hizo con una herramienta diferente).

X: Variables independientes controladas.

X_1 : dos suelos diferentes, franco arcilloso y franco limoso.

X_2 : velocidad de trabajo del equipo (tres velocidades: 2, 3 y 4 km/h)

Z: Variables independientes no controladas.

Z_1 : W, MO, Da, M, T, FR y P. Se midieron y registraron antes o durante los experimentos de campo.

Z₂: otras propiedades del suelo. Se midieron pero no se incluyeron en el modelo: resistencia a la penetración, humedad a capacidad de campo, límite de soltura, cohesión del suelo, ángulo de fricción interna (cuantitativo; error sistemático) (ver Anexo F los valores de algunas de estas propiedades).

Z₃: factores ambientales (temperatura ambiente).

Yh: variable dependiente (variable respuesta); pérdida de peso de las herramientas (N.s⁻¹).

2.5 Análisis de los mecanismos de desgaste

Las superficies de las herramientas sometidas a los experimentos de campo fueron analizadas con el propósito de identificar los mecanismos de desgaste predominantes, teniéndose presente las condiciones dinámicas de operación y las propiedades del suelo. Se registraron imágenes utilizando cámara digital y estereoscopio marca Nikon.

2.6 Construcción del modelo de abrasividad de suelos

2.6.1 Índice de abrasividad (*Ia*)

Se realizó una revisión de los diferentes modelos analíticos, publicados por diferentes investigadores, que relacionan el desgaste con las propiedades físicas, mecánicas y estructurales de los suelos.

Para relacionar los diferentes parámetros de abrasividad elegidos ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ y a_7) y determinar el índice de abrasividad de un suelo agrícola, se aplicó el principio de superposición, donde cada parámetro se analizó por separado y se normalizó entre 0,1 y 0,9, luego se agruparon en conjunto mediante un modelo donde el índice de abrasividad total (*Ia*) del suelo en estudio, correspondió a la multiplicación entre ellos, como lo expresa la ecuación (2.3); de tal manera, que el índice se incrementó a medida que sus parámetros fueron más próximos a la unidad. Donde se omiten los extremos 0 y 1, por la razón fundamental que ninguno de los parámetros a_i se calificó con valor "0", pues anularía la ecuación (2.3), donde es posible que un a_i tienda a un valor muy bajo (casi "0") pero otros a_i tiendan a la unidad.

$$Ia = k_1 a_1 . k_2 a_2 . k_3 a_3 . k_4 a_4 . k_5 a_5 . k_6 a_6 . k_7 a_7 \quad (2.3)$$

$$0,1 < Ia < 0,9$$

Donde,

I_a : Índice de abrasividad

a_i : Factor de abrasividad, en función de los valores de cada variable establecida como de influencia significativa.

k_i : Coeficiente que le otorga un peso mayor o menor a cada factor de abrasividad, de acuerdo a su valor dentro del modelo de regresión múltiple.

2.6.2 Metodología empleada para determinar cada parámetro de abrasividad

En la Tabla 2-3 se presentan las propiedades y factores que se consideraron con mayor influencia en la abrasividad de suelos agrícolas (de acuerdo a lo expuesto en la revisión de literatura, en los numerales 1.4 y 1.5).

Tabla 2-3: Propiedades y/o factores seleccionados para explicar la abrasividad de suelos agrícolas.

Propiedad o factor	Símbolo	Parámetro adimensional ($0 < a_i < 1$)
Humedad gravimétrica del suelo	W	a_1
Densidad aparente	Da	a_2
Granulometría (fragmentos de roca / tierra fina)	FR / T	a_3
Contenido de materia orgánica	MO	a_4
Morfología de las partículas	M	a_5
Dureza de las partículas/dureza superficial herramienta	Ha / Hm	a_6
Condiciones dinámicas de operación (Potencia)	P	a_7

2.6.3 Análisis dimensional y análisis de regresión lineal multivariado

Es posible que algunos de los anteriores parámetros de abrasividad tengan un mayor peso en la abrasividad de un suelo que otros. Como solución a lo anterior se utilizó la teoría de análisis dimensional (teorema PI de Buckingham) y análisis de regresión lineal multivariado, como complemento al principio de la superposición, con el objeto de explicar la influencia específica de cada variable en el índice de abrasividad de un suelo agrícola. En general se recomienda realizar una lista lo más completa posible de las variables que intervienen en el desgaste que el suelo ocasiona a la herramienta. Donde la variable desgaste (Yh) se debe expresar como función genérica de todas ellas.

En el desgaste de una herramienta agrícola intervienen múltiples variables (suelo, herramienta, sistema de potencia, medio ambiente, entre otras), algunas de ellas descritas en la revisión de literatura. Se identificaron nueve **variables primarias** que hipotéticamente se consideraron con mayor influencia en el desgaste de una herramienta agrícola (se trabajó con un solo tipo de herramienta agrícola y a una profundidad constante). Las variables seleccionadas se presentan en la ecuación (2.4) (En la Tabla 2-4 se presentan las variables con sus dimensiones básicas).

$$f(W, Da, FR, T, MO, Ha/Hm, M, P, Yh) = 1 \quad (2.4)$$

Tabla 2-4: Descomposición de los parámetros en sus dimensiones básicas.

Símbolo del parámetro	Nombre	Dimensión básica	SI
Yh	Desgaste de la herramienta	[F].[T] ⁻¹	N . s ⁻¹
Da	Densidad aparente	[F].[L] ⁻³	N . m ⁻³
W	Humedad gravimétrica del suelo	[L] ³	m ³
MO	Contenido de materia orgánica	[L] ³	m ³
M	Morfología	---	---
T	Tierra fina	[F]	N
FR	Fragmentos de roca	[F]	N
Ha / Hm	Dureza de las partículas / Dureza herramienta	---	---
P	Potencia suministrada a la herramienta	[F].[L].[T] ⁻¹	N . m . s ⁻¹

Se dividieron las **variables en dependientes e independientes**

Variables independientes no controladas: Da, W, MO, T, FR, M, Ha, Hm, P.

Variables independientes controladas: velocidad de trabajo (v) y tipo de suelo (s): tres velocidades y dos tipos de suelos vérticos. Cada tratamiento con diez repeticiones (ver Tabla 2-1).

Variables dependientes (variable respuesta): Yh.

Dimensiones de W, MO, T y FR. Por el hecho que el arado altera un volumen de suelo, de acuerdo a su profundidad y ancho de trabajo, se asociaron dimensiones longitudinales a MO y W; mientras que a T y FR se le asociaron dimensiones de peso. Se debe tener también presente que W y MO tienen efectos muy diferentes en el desgaste de la herramienta: mientras W y MO tienen efecto lubricante, T y FR tienen efecto de oponerse al desplazamiento de la herramienta. De acuerdo a lo anterior, la transformación dimensional propuesta se justifica de la siguiente manera:

- Tipo de suelo Dimensional de W y MO: Como unidad dimensional se eligió el volumen (L^3); para el caso específico de MO téngase presente que su peso es casi despreciable ante el peso de un mismo volumen de FR, por lo que se considera que en MO influye más el dimensional volumétrico. Es posible que el contenido de agua pueda tener dimensión gravimétrica o volumétrica, pero bajo la situación que su presencia se asocia a un efecto lubricante, se dimensionó con medición volumétrica.
- Dimensional de T y FR: su variación está más asociada a dimensionales de peso. Cada una de las muestras tomadas en la minicalicata fue pesada en la balanza de precisión descrita en el numeral 2.4. La medida dimensional considerada para el contenido de T y contenido de FR, fue su peso.

Dimensiones de M. La Morfología de las partículas (M), se expresó de manera adimensional. Se determinó solo para las gravillas con dimensiones entre 2 y 5 mm (ver justificación en numeral 2.2.2).

2.6.4 Secuencia seguida para el desarrollo de la ecuación dimensional

- La ecuación (2.4) matemáticamente es equivalente a la ecuación (2.5). (Murphy, 1950).

$$Y_h = c_1 \cdot W^{c_2} \cdot MO^{c_3} \cdot T^{c_4} \cdot FR^{c_5} \cdot Da^{c_6} \cdot P^{c_7} \cdot M^{c_8} \cdot (Ha/Hm)^{c_9} \quad (2.5)$$

Dimensionalmente la ecuación (2.5) se expresa como la ecuación (2.6) en las dimensiones básicas de fuerza (F), longitud (L) y tiempo (T).

$$F \cdot T^{-1} = c_1 \cdot (L^3)^{c_2} \cdot (L^3)^{c_3} \cdot (F)^{c_4} \cdot (F)^{c_5} \cdot (F \cdot L^{-3})^{c_6} \cdot (F \cdot L \cdot T^{-1})^{c_7} \quad (2.6)$$

- Se determinó la matriz dimensional (Tabla 2-5), compuesta por los exponentes de las dimensiones básicas.

$$F: \quad 1 = c_4 + c_5 + c_6 + c_7 \quad (2.7)$$

$$L: \quad 0 = 3c_2 + 3c_3 - 3c_6 + c_7 \quad (2.8)$$

$$T: \quad -1 = -c_7 \quad (2.9)$$

Tabla 2-5: Matriz dimensional del experimento.

$$\begin{matrix} F \\ L \\ T \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & -3 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

- Se verificó que la matriz dimensional representa un subespacio vectorial del fenómeno, lo que significa que este subespacio debe ser tridimensional (F, L, T). Para tal verificación se hizo uso de las propiedades características de matrices, para un espacio vectorial con dimensión n, el determinante de cualquier subespacio referente a la menor combinación dimensional (n) de cualquier dimensión n de este subespacio debe ser diferente de cero. Para verificar lo anterior, se eligió el subespacio c5, c6 y c7:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}$$

El determinante de este subespacio es 3, por lo tanto la matriz propuesta representó un subespacio vectorial del fenómeno.

- Se resolvió el sistema de ecuaciones (2.7) a (2.9) en términos de c5, c6 y c7. Despejando y reemplazando entre las ecuaciones se obtienen las ecuaciones (2.10) y (2.11):

$$c_5 = -c_2 - c_3 - c_4 - 1/3 \quad (2.10)$$

$$c_6 = c_2 + c_3 + 1/3 \quad (2.11)$$

Reemplazando (2.9), (2.10) y (2.11) en los coeficientes de la ecuación (2.5) se obtiene la ecuación (2.12).

$$Y_h = c_1 \cdot \frac{(W.Da/FR)^{c_2} \cdot (MO.Da/FR)^{c_3} \cdot (T / FR)^{c_4} \cdot (M)^{c_5} \cdot (Ha / Hm)^{c_6}}{(P.Da^{1/3} / FR^{1/3})} \quad (2.12)$$

Con mediciones y experimentos de campo se hallaron: Da, FR, Ha, Hm, W, MO, M, T y P. Los exponentes (c2, c3, c4, c5 y c6) y el coeficiente (c1) se determinaron con el método de “mínimos cuadrados – Gauss – Newton” (se utilizó el programa SOLVER de Excel – ver en el Anexo C la matriz utilizada).

Utilizando la prueba de Kolmogorov – Smirnov se compararon los datos reales de desgaste en campo con los datos del modelo obtenido a partir de la ecuación (2.12).

La ecuación original (2.4), tenía 9 incógnitas, y fue reducida a la ecuación (2.12) con 6 incógnitas. Obviamente, varias formas de reducir la ecuación son posibles, dependiendo de cuales exponentes se elijan. Pero en cada caso las cantidades entre paréntesis son adimensionales, donde también es adimensional el coeficiente c1.

Los Pi términos fueron representados en su forma aritmética genérica de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\pi_1 &= Yh \cdot FR^{1/3} / P \cdot Da^{1/3} \\ \pi_2 &= W \cdot Da / FR \\ \pi_3 &= MO \cdot Da / FR \\ \pi_4 &= T / FR \\ \pi_5 &= M \\ \pi_6 &= Ha / Hm\end{aligned}$$

- Se determinó la correlación entre los Pi – términos con el propósito de encontrar cuales gráficos adimensionales tienen un comportamiento que facilite la interpretación de los datos.
- Por último se seleccionaron los Pi términos que poseían mayores coeficientes de correlación con el objeto de construir gráficos adimensionales relativos a los parámetros deseados.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de propiedades del suelo

En la Tabla 3-1 se resumen los estadísticos básicos de las propiedades del suelo, granulometría y contenido de materia orgánica, los cuales fueron determinados meses antes de los experimentos de campo. En el Anexo D se presentan las mediciones de granulometría realizadas en el lote No. 8 de Cotové que se utilizaron en la interpolación con el método kriging puntual y elaboración de correspondientes mapas de isolíneas, con lo que se delimitaron las áreas experimentales. Para hallar los mapas de isolíneas de las variables de interés, se siguió el procedimiento descrito en la metodología (numeral 2.3.3).

Tabla 3-1: Principales estadísticos de las mediciones de granulometría y contenido de materia orgánica realizadas en el lote No. 8 del Centro Agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia.

(a) Granulometría

Propiedades (g)	Estadísticos (valores con dimensiones en g)											
	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p	n	
Arcillas	798.8	260.0	32.5	171.1	1168.0	770.5	959.4	-4.2	1.5	0.000	57	
Limos	1026.5	322.1	31.4	575.8	2317.1	840.7	1074.9	6.2	7.2	0.000	57	
Arenas	Muy fina	132.8	49.3	37.1	81.5	363.3	99.2	155.8	6.8	11.6	0.000	57
	Fina	143.4	43.2	30.1	79.5	326.6	117.0	159.6	4.8	6.9	0.000	57
	Media	135.0	29.5	21.9	63.4	203.0	115.9	156.4	-0.1	-0.3	0.983	57
	Gruesa	240.6	80.4	33.4	101.1	430.1	188.2	296.3	1.3	-0.8	0.069	57
	Muy Gruesa	74.7	37.4	50.1	8.4	185.4	46.1	100.2	2.1	0.0	0.018	57
	Total	726.4	129.2	17.8	433.9	1047.4	632.9	798.9	0.6	-0.1	0.901	57
Gravillas	Fina	66.1	46.6	70.4	6.7	204.3	36.0	92.0	4.1	2.3	0.000	57
	Media	59.7	117.2	196.4	2.3	864.0	14.8	75.5	18.6	63.3	0.000	57
	Gruesa	63.2	122.4	193.5	0.0	699.0	0.0	52.5	10.8	22.0	0.000	57
	Total	189.0	263.4	139.4	14.3	1767.2	62.4	222.8	13.5	36.4	0.000	57
Gravas	57.5	210.4	366.1	0.0	1268.0	0.0	0.0	13.9	33.8	0.000	57	
Tierra fina	2551.7	325.1	12.7	1772.0	3498.3	2345.4	2760.9	-0.4	1.0	0.796	57	
Fragmentos de roca	246.5	360.7	146.3	14.3	2025.9	64.6	245.7	9.9	18.6	0.000	57	

(b) Materia orgánica (MO)

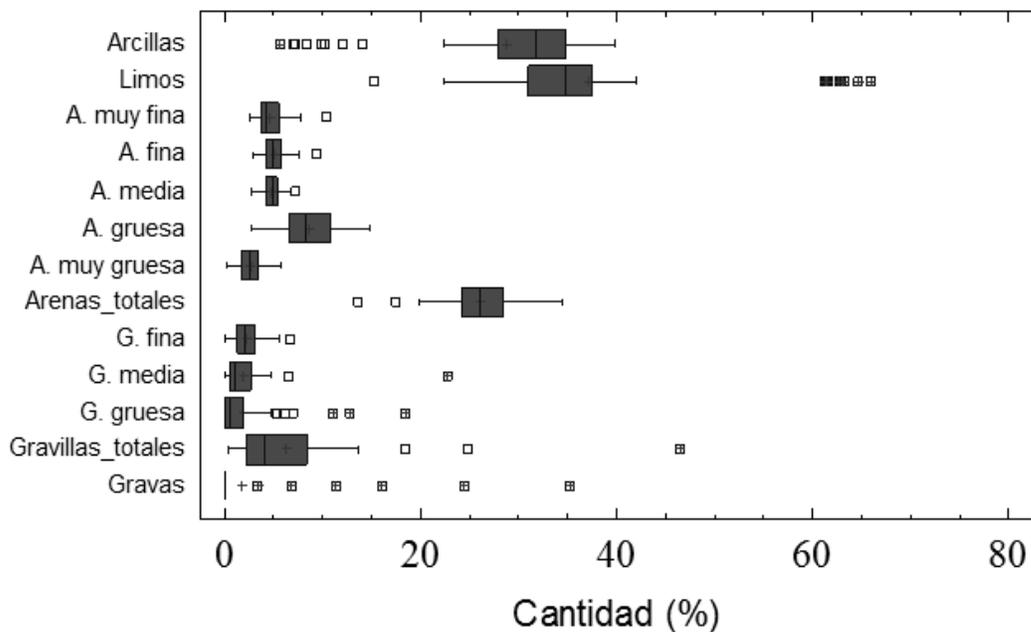
Propiedades	Estadísticos (valor de MO en %)										
	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p	n
MO	6.1	2.7	44.9	3.0	11.4	3.8	8.8	1.5	-2.1	0.000	57

Q1: Cuartil inferior; Q2: Cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación; S: sesgo; K: kurtosis; n: No. de datos.

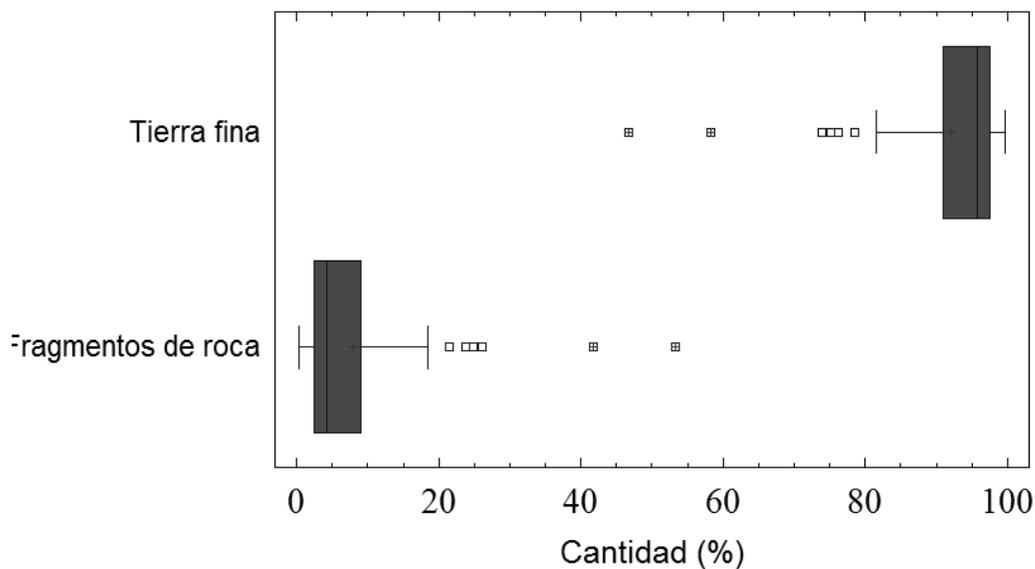
Si Valor p > 0.05 de Shapiro-Wilk, se considera que la distribución de datos de la variable es normal.

En la Figura 3-1 se observan los diagramas de cajas de la distribución granulométrica con varios valores extremos (*outliers*) con alta presencia en gravillas gruesas y medias, y en gravas.

Figura 3-1: Gráfico de cajas de la granulometría del suelo de Cotové (a) granulometría subdividida en todos los grupos de tamaños de partículas (%) (b) Granulometría dividida en dos componentes, tierra fina y fragmentos de roca (%). (A: arenas; G: gravillas).



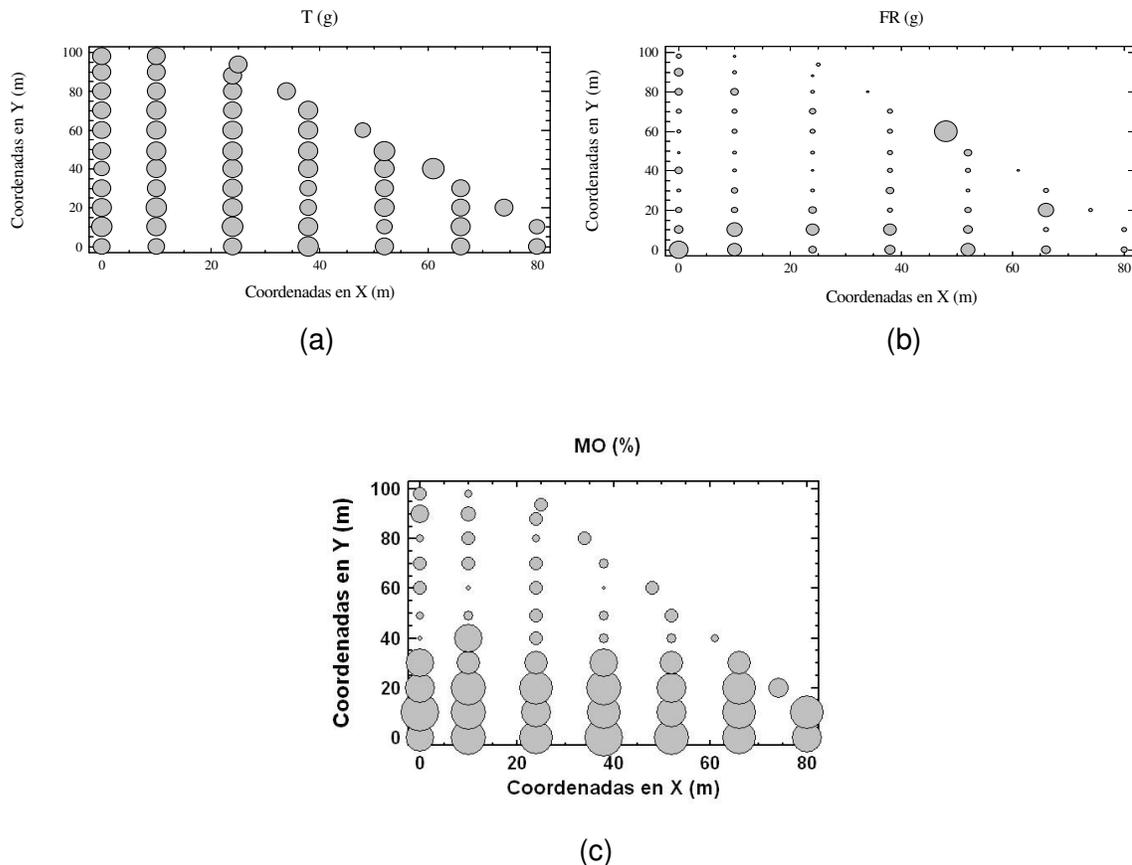
(a)



(b)

La Figura 3-2 muestra la distribución relativa de los valores que tomaron algunas de las variables estudiadas en el campo (el tamaño de los círculos es proporcional al valor obtenido).

Figura 3-2: Gráficos de burbujas de la distribución espacial relativa de los valores de algunas propiedades superficiales del suelo de Cotové. a) T (tierra fina, en g); b) FR (fragmentos de roca, en g). c) MO (materia orgánica, en %).



La mayoría de las propiedades del suelo que fueron evaluadas tienen una variabilidad relativamente alta ya que poseen amplios rangos de valores, alta desviación estándar y altos coeficientes de variación. Además los diferentes tipos de FR (Tabla 3-1 a) tienen una fuerte asimetría (9,2) y, adicionalmente la MO, no tiene una distribución normal de sus datos (ver Tabla 3-1 b). En la Figura 3-2 se observa que en dicha distribución los valores de T no tienen, aparentemente, ninguna tendencia espacial en su distribución, mientras que los valores de FR y MO sí presentan una tendencia espacial que es bastante notable en MO.

Al encontrarse tendencia espacial en la distribución de algunos valores de las propiedades del suelo, ésta se eliminó para cumplir el supuesto de estacionaridad y poder realizar los análisis de semivariografía. Para lograr este propósito se trabajó la semivarianza con los residuales de la regresión, una vez que se verificó que las variables

presentaban distribución normal, o por lo menos simétrica, y homogeneidad de varianza. Realizados estos procedimientos, los residuales de todas las variables tuvieron varianzas homogéneas y los que no fueron normales ni simétricos, obligó a hacerles transformaciones. Si con ninguna de las transformaciones ensayadas se obtenía normalidad ni simetría, la semivariografía se realizaba con los datos originales (ver en el Anexo J un artículo elaborado durante la presente investigación, que ilustra detalladamente el procedimiento).

En el Anexo F se observan valores de humedad gravimétrica y densidad aparente medidas meses antes en el lote seleccionado para los experimentos de campo, pero estas propiedades varían de día a día por múltiples factores, por lo que fueron determinadas nuevamente minutos antes de realizar los experimentos de campo. En el mismo anexo se incluyen otras propiedades del suelo no consideradas en el modelo de abrasividad de suelos agrícolas (humedad: higroscópica, en capacidad de campo, del límite de soltura; y resistencia a la penetración), que fueron consideradas para delimitar los tipos de suelos presentes en el lote de estudio. En el Anexo G se hace referencia a la misma Tabla 3-1 expresando la granulometría en porcentajes.

Además de las propiedades ya mencionadas, se determinaron otras variables de interés que se incluyeron en el modelo de abrasividad de suelos: la morfología y dureza de las partículas. El cálculo para ambos casos se hizo con base en las gravillas finas, lo anterior se justifica con el resultado de la Figura 3-1 donde las gravillas finas no poseen valores anómalos, además de tener la distribución más uniforme de los fragmentos de roca (presencia en todos los sitios de muestreo).

En la Figura 3-3 se registran las imágenes de la mayoría de los minerales hallados en los suelos seleccionados en Cotové. En la Tabla 3-2 se presentan los valores de dureza hallados para las gravillas (2 – 5 mm) de acuerdo a la literatura, en función del tipo de minerales encontrados en cada sitio de la malla de muestreo original. La presencia de minerales en porcentaje, de los 57 sitios muestreados, es dominada por los minerales con dureza 7 en la escala Mohs (50,4 %). En la Figura 3-4 se muestra el promedio de minerales hallados, donde “otros” corresponde a los siguientes minerales: granito (1,8%), feldespato (1,3%), roca silificada (1,2%), shale (0,7%), roca verde (0,7%), pórfido (0,3%), arenisca (0,2%), conglomerado (0,2%) y roca metamórfica (0,1%). En la Tabla 3-3 se presentan los principales estadísticos de esta propiedad del suelo.

Figura 3-3: Minerales hallados en el lote de estudio (Cada subdivisión de la escala corresponde a 0,2 mm). (Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia).



Cuarzo



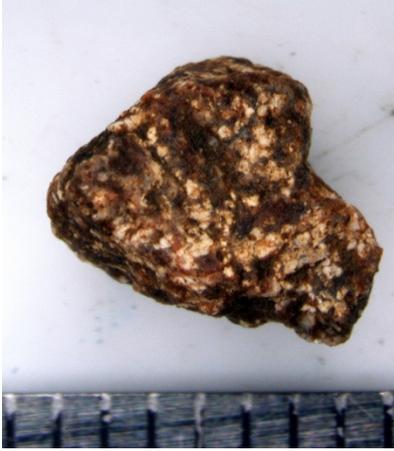
Chert



Feldespatos



Granito



Basalto



Shale



Roca verde



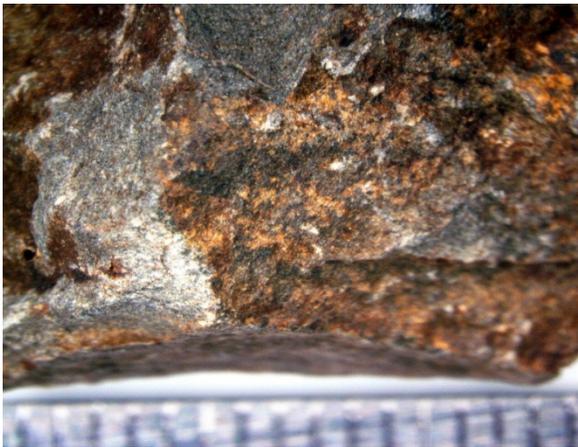
Roca salificada



Pórfido



Lodolita



Limolita



Gabro



Arenisca



Arcillolita



Tabla 3-2: Dureza ponderada de las gravillas finas (2 – 5 mm) calculada en cada uno de los sitios de la malla de muestreo original (Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia).

Coordenadas		% de Minerales hallados en cada sitio															Dureza ponderada	
X (m)	Y (m)	Chert Mohs: 7	Cuarzo Mohs: 7	Gabro Mohs: 6	Basalto Mohs: 5.8	Granito Mohs: 6.5	Lodolita Mohs: 3	Arcillolita Mohs: 3	R. S* Mohs: 7	R. V.* Mohs: 7.3	Limolita Mohs: 3	Feldespatos Mohs: 6.3	Congl.* Mohs: 3	Shale Mohs: 3	R. M.* Mohs: 4.8	Porfido Mohs: 6	Arenisca Mohs: 5	Dureza ponderada Mohs
0	0	70	10	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.85
10	0	40	30	20	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.75
24	0	50	30	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.76
38	0	50	20	0	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.71
52	0	40	20	0	30	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.59
66	0	28	11	14	7	3	25	4	8	0	0	0	0	0	0	0	0	5.60
80	0	50	10	0	20	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.96
0	10	30	10	0	30	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.44
10	10	20	12	10	15	0	30	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	5.32
24	10	40	10	0	30	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.84
38	10	40	0	0	40	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.72
52	10	28	35	0	14	7	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.16
66	10	33	0	0	8	8	25	8	9	9	0	0	0	0	0	0	0	5.57
80	10	42	17	0	8	0	14	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	6.34
0	20	25	20	0	15	0	10	15	0	0	15	0	0	0	0	0	0	5.22
10	20	20	10	30	0	0	0	10	0	0	30	0	0	0	0	0	0	5.10
24	20	10	20	0	10	20	0	10	0	0	30	0	0	0	0	0	0	5.18
38	20	21	7	7	8	7	14	15	0	0	14	7	0	0	0	0	0	5.03
52	20	14	15	14	14	0	0	15	0	0	28	0	0	0	0	0	0	4.97
66	20	13	27	7	6	0	20	13	0	0	14	0	0	0	0	0	0	4.98
74	20	38	15	7	0	0	7	15	0	0	16	0	0	0	0	0	0	5.36
0	30	25	17	0	25	0	17	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.38
10	30	33	8	8	9	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.13
24	30	43	13	0	15	0	14	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.66
38	30	25	25	0	10	0	20	0	0	10	0	0	10	0	0	0	0	5.71
52	30	35	18	6	6	0	17	12	0	6	0	0	0	0	0	0	0	5.73
66	30	47	7	0	20	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.72
0	40	0	7	64	0	0	14	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	5.20
10	40	33	17	22	5	0	11	5	0	0	0	0	0	0	7	0	0	5.93
24	40	31	23	15	8	0	15	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.83
38	40	40	10	5	5	0	20	5	0	0	0	10	0	0	0	5	0	5.77
52	40	42	15	0	0	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.28
61	40	27	13	7	7	0	20	13	0	0	8	0	0	0	0	0	5	5.11
0	49	35	18	0	12	6	17	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.67
10	49	50	20	0	0	0	0	10	0	0	10	10	0	0	0	0	0	6.13
24	49	43	28	0	0	0	14	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.84
38	49	20	30	0	0	0	30	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	5.33
52	49	30	20	30	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.90
0	60	24	6	3	3	3	49	6	0	0	0	3	0	3	0	0	0	4.58
10	60	27	19	0	4	0	35	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.95
24	60	30	11	7	18	0	26	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.35
38	60	25	0	0	0	0	45	0	0	0	0	12	0	0	0	12	6	4.88
48	60	30	10	5	0	0	20	20	0	5	0	10	0	0	0	0	0	5.30
0	70	36	14	7	14	0	7	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.60
10	70	44	13	6	13	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.80
24	70	35	6	12	12	0	18	0	12	5	0	0	0	0	0	0	0	6.03
38	70	23	18	12	6	0	17	18	0	6	0	0	0	0	0	0	0	5.43
0	80	30	10	20	0	0	20	0	10	0	0	10	0	0	0	0	0	5.93
10	80	60	10	0	20	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.36
24	80	40	10	0	20	0	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.56
34	80	43	14	0	15	0	13	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.70
0	90	25	20	5	5	0	20	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.09
10	90	35	17	0	0	0	17	18	0	0	0	0	0	12	0	0	0	5.10
24	88	35	17	0	0	0	17	18	0	0	0	0	0	12	0	0	0	5.10
0	98	40	6	0	0	6	40	6	0	0	0	2	0	0	0	0	0	5.12
10	98	31	25	0	7	0	19	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.43
25	93.8	35	12	6	23	0	17	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.70

* R.S: Roca silicificada; R.V: Roca verde; Congl.: Conglomerado; R.M: Roca metamorfica

Figura 3-4: Promedio de porcentaje de minerales hallados en el lote de estudio (determinado para 57 sitios).

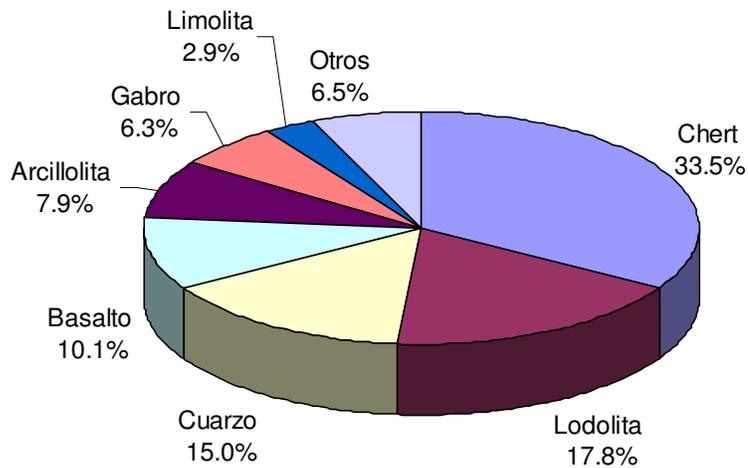


Tabla 3-3: Principales estadísticos de la dureza de partículas de suelo (Ha).

Propiedades	Estadísticos (valor de Ha en escala Mohs)										
	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p	n
Ha	5.6	0.5	9.2	4.6	6.9	5.2	5.8	2.0	0.1	0.026	57

Q1: Cuartil inferior; Q2: Cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación; S: sesgo; K: kurtosis; n: No. de datos.
Si Valor p > 0.05 de Shapiro-Wilk, se considera que la distribución de datos de la variable es normal.

En cuanto a la morfología de las partículas de suelo, en la Tabla 3-4 se presentan los valores calculados con base en las gravillas finas. La morfología se determinó por dos métodos: puntas (SPQ) y perímetros (MP) como se describe en el numeral 2.2.2. La Tabla 3-5 y Figura 3-5 presentan sus principales estadísticos y comportamiento.

Tabla 3-4: Morfología por métodos de puntas (SPQ) y de perímetros (MP) de las gravillas (2 – 5 mm), calculada en cada uno de los sitios de la malla de muestreo original.

Coordenadas		Gravillas de 2 - 5 mm	
X (m)	Y (m)	MP	SPQ
0	0	0.0982	0.6021
10	0	0.1044	0.6212
24	0	0.0935	0.5521
38	0	0.1071	0.5591
52	0	0.0991	0.5200
66	0	0.0956	0.5861
80	0	0.0906	0.5518
0	10	0.1038	0.5224
10	10	0.0915	0.5388
24	10	0.1115	0.6413
38	10	0.1010	0.5766
52	10	0.0956	0.5936
66	10	0.0997	0.5919
80	10	0.0982	0.6046

0	20	0.0790	0.5339
10	20	0.1077	0.5889
24	20	0.0911	0.4989
38	20	0.0827	0.5685
52	20	0.0925	0.5618
66	20	0.0902	0.5706
74	20	0.1042	0.5346
0	30	0.0838	0.6551
10	30	0.0872	0.5485
24	30	0.0947	0.6358
38	30	0.0929	0.4500
52	30	0.0950	0.5746
66	30	0.1050	0.6200
0	40	0.0977	0.5318
10	40	0.1072	0.5948
24	40	0.1024	0.5613
38	40	0.0950	0.5633
52	40	0.0980	0.5443
61	40	0.1044	0.5657
0	49	0.1054	0.5368
10	49	0.1045	0.5793
24	49	0.0866	0.5901
38	49	0.0997	0.5250
52	49	0.1081	0.6126
0	60	0.0934	0.5577
10	60	0.0978	0.5225
24	60	0.1059	0.5978
38	60	0.0978	0.5618
48	60	0.1042	0.5429
0	70	0.0979	0.5792
10	70	0.1010	0.5900
24	70	0.0870	0.5672
38	70	0.0887	0.6088
0	80	0.0916	0.5308
10	80	0.1049	0.5393
24	80	0.1032	0.6004
34	80	0.0972	0.5870
0	90	0.0840	0.5548
10	90	0.0919	0.4824
24	88	0.1101	0.5316
0	98	0.0867	0.5329
10	98	0.0982	0.6199
25	93.8	0.0874	0.6185

Tabla 3-5: Principales estadísticos de la variable morfología de partículas de suelo (M), por dos métodos: MP y SPQ.

Método de cálculo	Estadísticos (M adimensional)										
	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p	n
M (MP)	0.1	0.0	7.9	0.08	0.11	0.1	0.1	-0.8	-1.0	0.319	57
M (SPQ)	0.6	0.0	7.0	0.45	0.66	0.5	0.6	-0.8	0.7	0.906	57

Q1: Cuartil inferior; Q2: Cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación; S: sesgo; K: kurtosis; n: No. de datos.

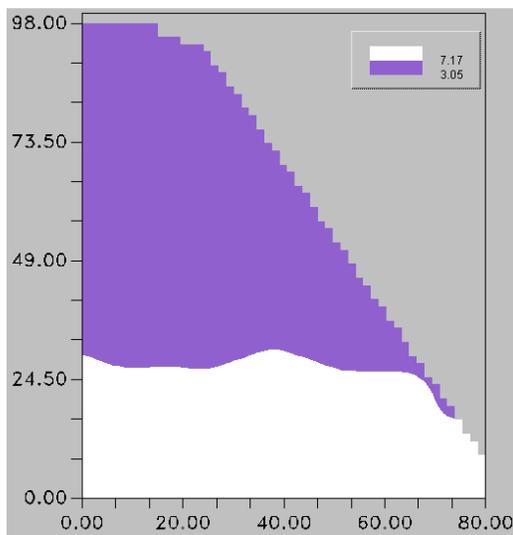
Si Valor p > 0.05 de Shapiro-Wilk, se considera que la distribución de datos de la variable es normal.

Análisis de variabilidad espacial (VE)

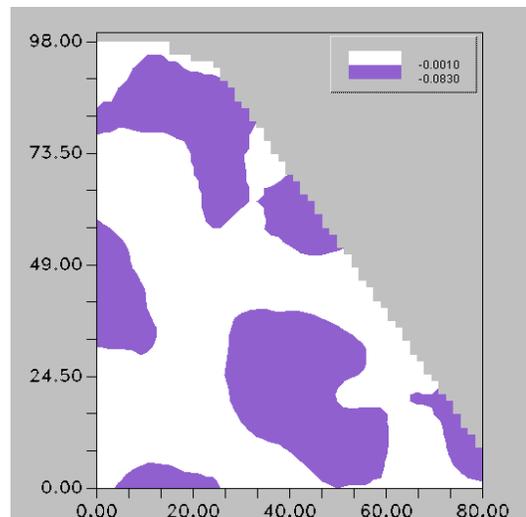
El análisis de variabilidad espacial VE se realizó para las variables: MO, T, FR, M, Ha. Se incluyó también la variable distribución de limos con el objeto de delimitar los dos tipos de suelos con presencia en el lote No. 8 de Cotové (franco arcilloso y franco limoso). El procedimiento seguido se describió en el numeral 2.3 de la metodología complementado con en Anexo B, donde se ilustra con un ejemplo todo el procedimiento de VE, con la interpolación con el método kriging puntual y elaboración de correspondientes mapas de isolíneas para la distribución de gravillas en el lote de estudio.

Se obtuvieron los siguientes mapas kriging de cada una de las variables de interés (Figura 3-5).

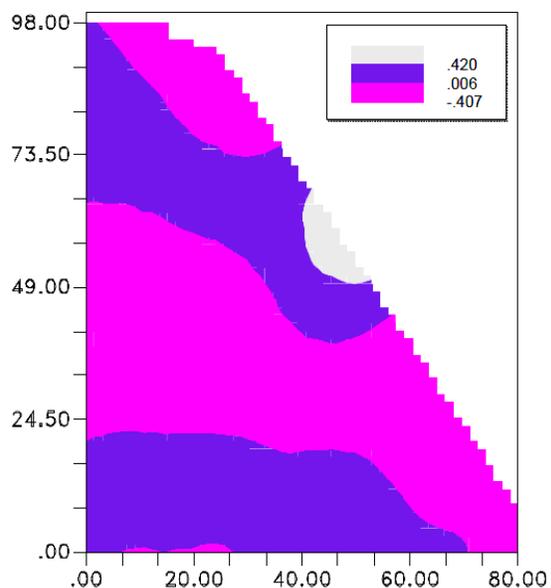
Figura 3-5: Mapas kriging del lote de estudio: a) MO (materia orgánica, %); b) T (tierra fina); c) FR (fragmentos de roca); d) Ha (dureza de las partículas de suelo); e) distribución de limos (residuales log. limos: reslogL) y distribución de gravilla media (logGm).



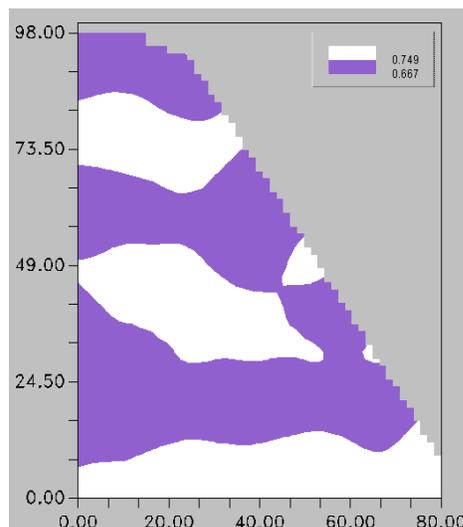
(a) MO datos reales (Materia orgánica)



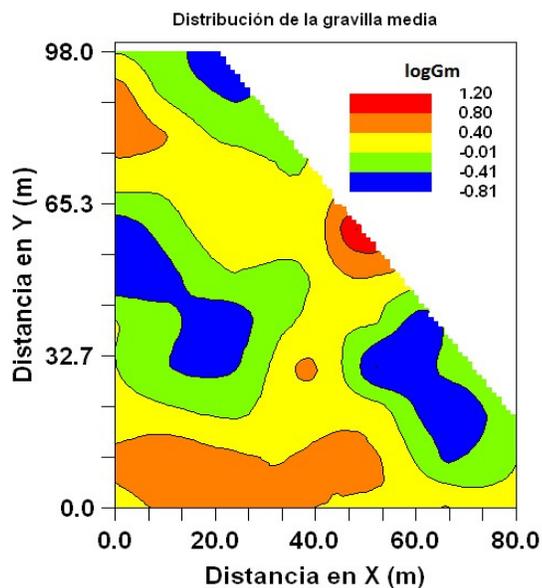
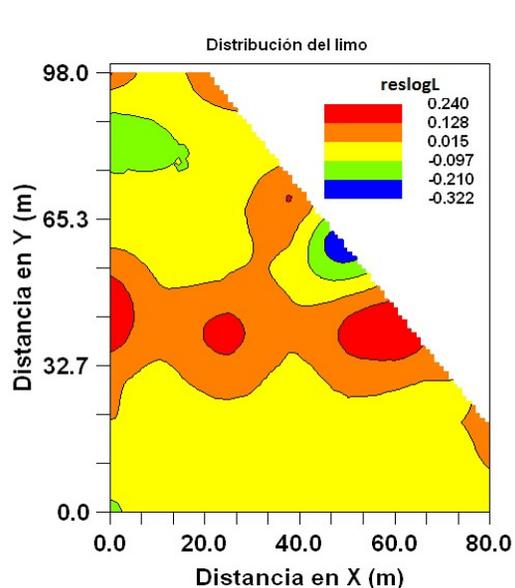
(b) Log10residualesT (Tierra fina)



(c) Residuales FR (Fragmentos de roca)



(d) Log10Ha (Dureza de partículas)



(e) Distribución de limos (reslogL) y de gravillas medias (logGm)

Ubicación de parcelas experimentales mediante el método de componentes principales

Utilizando el método de componentes principales se demostró que en el lote de estudio de Cotové había presencia de dos suelos diferentes: franco arcilloso y franco limoso.

En la Tabla 3-6 se observa que los primeros 3 componentes principales explicaron aproximadamente el 60 % de la variabilidad de las propiedades estudiadas. En la Tabla

3-7 se resaltan en negrilla los coeficientes de mayor valor (absoluto) que corresponden a las variables con mayor peso dentro de cada componente. Se emplearon las siguientes abreviaturas: Ar (arcilla); L (limo); arenas, muy fina (Amf), media (Am), gruesa (Ag), muy gruesa (Amg); gravillas, fina (Gf), media (Gm), gruesa (Gg); coeficiente higroscópico (CH), humedad a capacidad de campo (CC); límite de soltura (LS); materia orgánica (MO) y densidad aparente (Da).

Tabla 3-6: Valores propios de los componentes principales y varianza explicada por ellos.

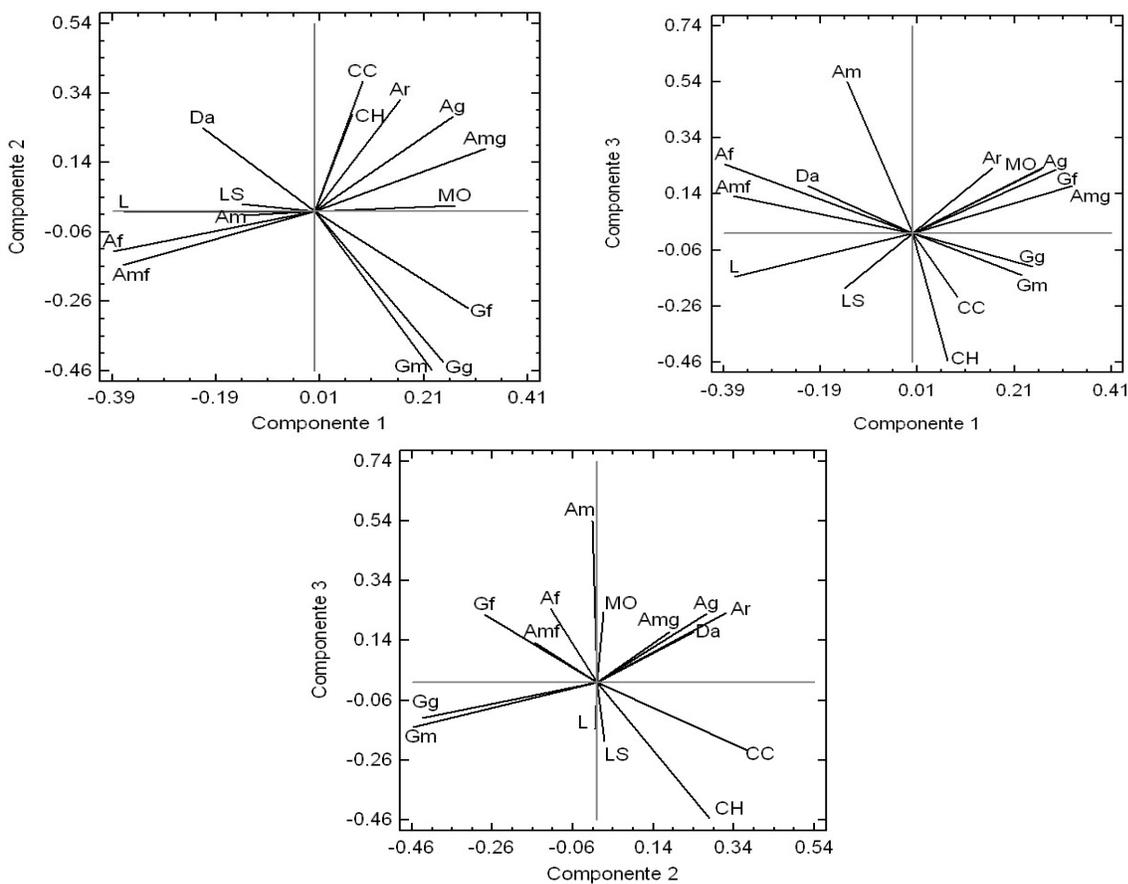
Número del componente	Valor propio	Porcentaje de varianza	Porcentaje acumulativo
1	468,952	31,263	31,263
2	252,495	16,833	48,096
3	17,973	11,982	60,078
4	115,359	7,691	67,769
5	103,501	6,9	74,669
6	0,889792	5,932	80,601
7	0,759279	5,062	85,663
8	0,604374	4,029	89,692
9	0,502009	3,347	93,039
10	0,374903	2,499	95,538
11	0,241988	1,613	97,151
12	0,159789	1,065	98,216
13	0,124572	0,83	99,046
14	0,0794874	0,53	99,576
15	0,0634286	0,423	100

Tabla 3-7: Peso de las variables en los tres primeros componentes principales.

Variable	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Ar	0,164264	0,321655	0,232353
L	-0,367603	-0,00369627	-0,156056
Amf	-0,370027	-0,154629	0,131689
Af	-0,388183	-0,114806	0,246172
Am	-0,13515	-0,0112169	0,540095
Ag	0,266164	0,272385	0,229606
Amg	0,329744	0,180752	0,17036
Gf	0,295049	-0,278926	0,227445
Gm	0,226259	-0,458225	-0,149625
Gg	0,248259	-0,434659	-0,119516
CH	0,0713799	0,279263	-0,454686
CC	0,0922125	0,373864	-0,227138
LS	-0,139641	0,0193087	-0,196581
MO	0,269406	0,0164166	0,236431
Da	-0,216523	0,239457	0,170279

En la Figura 3-6 se muestran las variables con más peso en los tres componentes, teniendo en cuenta la magnitud y dirección del vector respectivo, así como su relación con los vectores cercanos.

Figura 3-6: Peso de las variables en los tres primeros componentes principales.



Con la información de la Tabla 3-7 y de la Figura 3-6 se seleccionaron las variables más relevantes en los tres componentes. Las propiedades seleccionadas fueron L, Af, Am, Gm, CC y CH (las cuales explicaron el 60% de la variabilidad física del lote seleccionado). Que coincidió con los resultados experimentales de Natsis *et al.* (2008) los cuales encontraron que las partículas gruesas del suelo y a las condiciones de humedad del mismo como responsables del desgaste por abrasividad en herramientas de arado de vertedera.

Las anteriores seis variables presentaron alta dependencia espacial (Tabla 3-8); los mapas kriging puntual confirmaron la presencia de tres sectores de acumulación diferencial de limo y de arena fina, orientados a lo largo del eje x de la malla de muestreo en una banda localizada entre los 30 y 60 m en la dirección del eje y, que correspondió al suelo franco limoso, el lote restante estaba constituido de suelo franco arcilloso (ver Figura 3-5e, donde la región central color naranja y rojo corresponde a suelos franco limoso, las regiones restantes a suelos franco arcillosos).

Tabla 3-8: Parámetros de la semivariografía de las propiedades estudiadas (Alcance = 63,25 m, lag = 5,89 m, pares en el lag 1 = 65). (Centro Agropecuario Cotové).

Variable*	Modelo	Nugget	Sill	Rango	C/Sill	R ² (%)
CC	Nugget	2,701	2,701	-	0	7,8
Am	Nugget	0,8793	0,8793	-	0	13,1
logGm	Esférico	0,0219	0,2418	27,4	90,9	66,3
reslogL	Exponencial	0,0053	0,0191	90	72,3	50,5
reslogAf	Gausiano	0,0013	0,0086	17,67	85,1	55,2
resCH	Exponencial	0,0116	0,1622	12,3	92,8	15,0

res: Residuales. log: Logaritmo base 10. CC: Capacidad de campo. Am: Arena media. Gm: Gravilla media. L: Limo. Af: Arena fina. CH: Coeficiente higroscópico.

¹ Porcentaje del sill que corresponde a variabilidad espacial.

3.2 Análisis de experimentos de resistencia al desgaste de las herramientas de arado de cincel durante la labranza

En el Anexo H se referencia los resultados de medición de la dureza de las 12 herramientas en escala Rockwell B (HRB). Se seleccionaron al azar 6 de las herramientas (P3, P5, P6, P7, P9 y P12) para los tratamientos experimentales proyectados. Dado que la dureza de las seis herramientas seleccionadas osciló entre 61,5 y 67,8 HRB, se realizaron análisis estadísticos exploratorios (Tabla 3-9), y análisis de varianza (ANOVA) dentro del grupo y entre grupos (Tabla 3-10 y Figura 3-7), respaldados con una prueba de rangos múltiples por el método de diferencia mínima significativa (LSD). El resultado fue que se presentan tres grupos homogéneos (P6 y P12; P3, P7 y P9; y P5) con un 5% de riesgo de que no sea válido el análisis.

Tabla 3-9: Estadísticos básicos de la dureza de las herramientas seleccionadas (HRB)

Herramienta (tratamiento)	Estadísticos de dureza de las herramientas (HRB)										
	n	Media	D.E	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
P3 (E11)	6	64.7	1.033	1.6	63	66	64	65	-0.67	0.3	0.461
P5 (E31)	6	67.8	1.169	1.7	66	69	67	69	-0.67	-0.2	0.405
P6 (E32)	6	61.8	1.169	1.9	60	63	61	63	-0.67	-0.2	0.405
P7 (E21)	6	65.0	1.414	2.2	63	67	64	66	0.00	-0.2	0.953
P9 (E22)	6	65.2	1.169	1.8	64	67	64	66	0.67	-0.2	0.405
P12 (E12)	6	61.5	1.049	1.7	60	63	61	62	0.00	-0.1	0.825

n: numero de medida; D.E: desviación estandar; Q1: cuartil inferior; Q2: cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación;

S: sesgo; K: kurtosis. Si valor p > 0.05 de Shapiro-Wilk, la distribución de datos de la variable es normal.

Tabla 3-10: Análisis de varianza con prueba de rangos múltiples LSD (HRB)

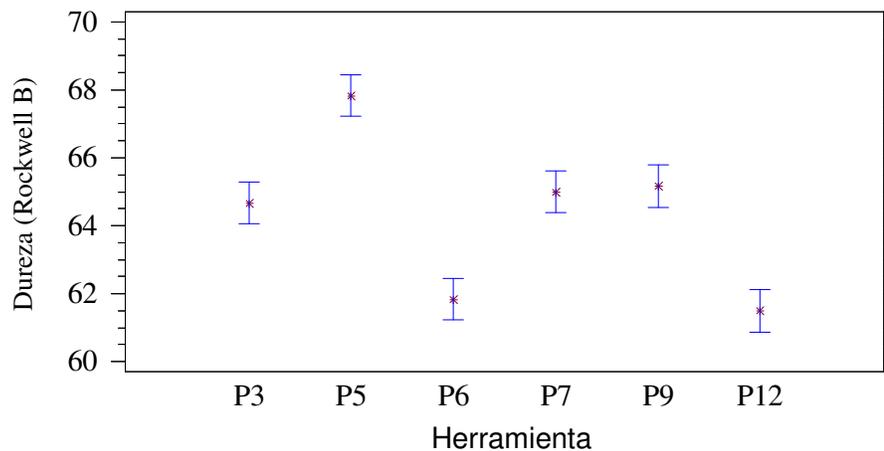
Análisis de varianza

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	166,667	5	33,3333	24,19	0,0000
Dentro del grupo	41,3333	30	1,37778		
Total (Corr.)	2080	35			

Prueba de rangos múltiples (LSD)

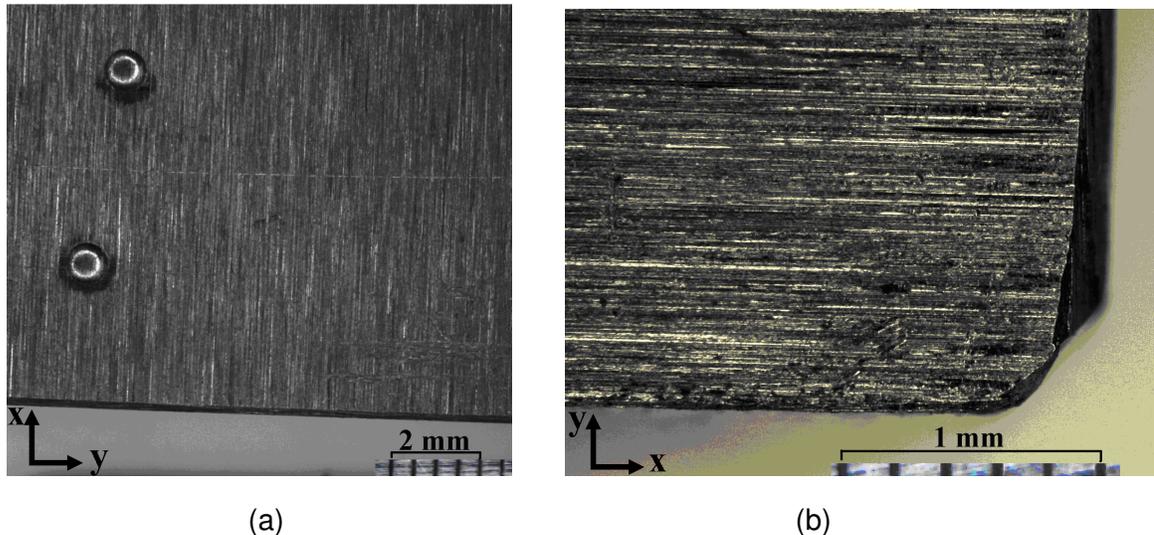
Método: 95,0 % LSD

Herramienta	Conteo	Media	Grupos Homogéneos
P12	6	61,5	X
P6	6	61,8333	X
P3	6	64,6667	X
P7	6	65,0	X
P9	6	65,1667	X
P5	6	67,8333	X

Figura 3-7: Medias e intervalos LSD (al 95%) de la dureza de herramientas.

En la Figura 3-8 se aprecia la textura superficial típica de las herramientas antes de realizar los ensayos de campo. La superficie se caracteriza por conservar evidencias de los procesos de maquinado empleados en la fabricación de la herramienta.

Figura 3-8: Imágenes de estereoscopio de herramienta P5 antes de los experimentos de campo. (a) Parte inferior central de la herramienta, los círculos corresponden a medidas de dureza HRB (cada número de la escala corresponde a 1 mm). (b) Vértice derecho.



En la Tabla 3-11 se observa el desgaste Yh de las herramientas en las diferentes líneas experimentales, cada una con los resultados de las variables de abrasividad seleccionadas (En el Anexo E se presentan los resultados completos de las mediciones de cada uno de los tratamientos efectuados sobre el suelo).

Tabla 3-11: Tratamientos y líneas experimentales (o repeticiones) a tres velocidades de trabajo (v_1 , v_2 y v_3) y en dos suelos (s_1 y s_2).

Variable	Lineas experimentales de E11 (v_1 : 2 km/h; s_1 : franco arcilloso)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Da ($N.m^{-3}$)	13141.38	12896.21	12798.14	13043.31	11964.54	12847.17	13043.31	12896.21	13141.38	13729.80
W (m^3)	1.37	1.43	1.39	1.28	1.27	1.34	1.42	1.32	1.25	1.39
FR/T *	0.080	0.089	0.071	0.066	0.079	0.062	0.067	0.071	0.060	0.069
MO (m^3)	0.43	0.46	0.46	0.45	0.46	0.45	0.46	0.46	0.42	0.47
M-SPQ *	0.558	0.557	0.599	0.562	0.556	0.595	0.568	0.565	0.572	0.557
M-MP *	0.091	0.093	0.097	0.090	0.093	0.097	0.092	0.092	0.089	0.093
Ha/Hm *	6.092	6.149	6.447	6.093	6.133	6.125	6.080	6.110	6.096	6.107
P ($N.m.s^{-1}$)	3645.25	3208.62	2804.19	3015.05	1969.49	2973.33	3609.09	3176.47	3305.92	2923.27
Yh ($N.s^{-1}$)	0.000081	0.000053	0.000046	0.000060	0.000046	0.000054	0.000058	0.000058	0.000061	0.000038

Variable	Lineas experimentales de E12 (v_1 : 2 km/h; s_2 : franco limoso)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Da ($N.m^{-3}$)	12552.96	12749.10	12847.17	12847.17	13239.45	13337.52	13729.80	13141.38	13043.31	13239.45
W (m^3)	1.41	1.32	1.34	1.39	1.44	1.39	1.34	1.39	1.39	1.39
FR/T *	0.026	0.026	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.021	0.021	0.020
MO (m^3)	0.24	0.26	0.24	0.25	0.26	0.23	0.22	0.24	0.25	0.23
M-SPQ *	0.574	0.572	0.570	0.569	0.567	0.565	0.564	0.562	0.560	0.558
M-MP *	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098	0.099	0.099	0.099	0.099
Ha/Hm *	6.322	6.325	6.327	6.327	6.326	6.323	6.318	6.311	6.304	6.297
P ($N.m.s^{-1}$)	1190.98	1818.15	1938.57	1965.90	2273.62	2435.74	2599.56	2141.26	2083.26	2418.67
Yh ($N.s^{-1}$)	0.000023	0.000029	0.000030	0.000025	0.000020	0.000026	0.000032	0.000024	0.000023	0.000026

Variable	Lineas experimentales de E22 (v2: 3 km/h; s2: franco limoso)									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Da (N.m ⁻³)	12602.00	13582.70	13680.77	12847.17	14073.05	13092.35	13827.87	13337.52	13190.42	13043.31
W (m ³)	1.57	1.61	1.46	1.59	1.55	1.52	1.46	1.55	1.47	1.49
FR/T *	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.025	0.025	0.026	0.027	0.027
MO (m ³)	0.20	0.19	0.17	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18
M-SPQ *	0.553	0.552	0.552	0.552	0.552	0.551	0.551	0.551	0.550	0.550
M-MP *	0.099	0.099	0.098	0.098	0.097	0.096	0.096	0.095	0.095	0.094
Ha/Hm *	6.167	6.158	6.147	6.136	6.126	6.113	6.099	6.088	5.995	5.883
P (N.m.s ⁻¹)	3645.13	4736.38	5077.64	4681.69	4711.04	4777.04	5492.71	4646.00	5083.76	4515.57
Yh (N.s ⁻¹)	0.000022	0.000022	0.000049	0.000020	0.000027	0.000027	0.000030	0.000028	0.000030	0.000030

Variable	Lineas experimentales de E21 (v2: 3 km/h; s1: franco arcilloso)									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Da (N.m ⁻³)	13239.45	13778.84	12847.17	13239.45	13239.45	13092.35	13190.42	13386.56	12847.17	12356.82
W (m ³)	1.43	1.24	1.55	1.37	1.33	1.72	1.29	1.29	1.33	1.19
FR/T *	0.080	0.084	0.088	0.092	0.092	0.098	0.099	0.102	0.103	0.104
MO (m ³)	0.46	0.48	0.49	0.48	0.50	0.50	0.53	0.47	0.49	0.49
M-SPQ *	0.599	0.595	0.591	0.587	0.583	0.579	0.575	0.571	0.567	0.563
M-MP *	0.102	0.102	0.103	0.103	0.103	0.104	0.104	0.104	0.104	0.105
Ha/Hm *	6.090	6.095	6.103	6.110	6.119	6.129	6.143	6.161	6.286	6.364
P (N.m.s ⁻¹)	6087.92	5578.55	4634.83	4956.48	4392.57	4523.72	4698.30	5180.17	4032.91	3456.01
Yh (N.s ⁻¹)	0.000152	0.000124	0.000060	0.000120	0.000070	0.000092	0.000075	0.000117	0.000124	0.000143

Variable	Lineas experimentales de E31 (v3: 4 km/h; s2: franco limoso)									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Da (N.m ⁻³)	13582.70	13533.66	13974.98	13680.77	13631.73	13288.49	13386.56	13484.63	13631.73	13337.52
W (m ³)	1.05	1.00	1.08	1.04	1.09	1.11	1.14	1.24	0.95	0.99
FR/T *	0.024	0.025	0.025	0.026	0.027	0.028	0.030	0.031	0.032	0.034
MO (m ³)	0.20	0.20	0.21	0.23	0.19	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25
M-SPQ *	0.552	0.552	0.552	0.552	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551	0.551
M-MP *	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098
Ha/Hm *	6.339	6.346	6.350	6.351	6.350	6.347	6.341	6.337	6.331	6.322
P (N.m.s ⁻¹)	11558.97	11554.07	12342.96	11500.09	10381.78	9005.09	9062.70	11259.72	11823.85	11017.41
Yh (N.s ⁻¹)	0.000055	0.000065	0.000064	0.000048	0.000070	0.000028	0.000069	0.000035	0.000054	0.000061

Variable	Lineas experimentales de E31 (v3: 4 km/h; s1: franco arcilloso)							
	51	52	53	54	55	56	57	58
Da (N.m ⁻³)	13386.56	13533.66	14220.15	14122.08	13533.66	14073.05	14171.12	13974.98
W (m ³)	0.88	0.91	0.91	0.93	0.85	0.86	0.86	0.91
FR/T *	0.094	0.098	0.103	0.107	0.109	0.112	0.115	0.118
MO (m ³)	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47	0.48	0.47	0.47
M-SPQ *	0.601	0.598	0.595	0.592	0.589	0.586	0.583	0.580
M-MP *	0.102	0.102	0.102	0.102	0.103	0.103	0.103	0.103
Ha/Hm *	6.100	6.112	6.130	6.214	6.245	6.296	6.286	6.302
P (N.m.s ⁻¹)	9376.35	10792.69	13311.48	12359.97	13786.67	11121.03	11947.71	11334.11
Yh (N.s ⁻¹)	0.000222	0.000193	0.000316	0.000267	0.000341	0.000286	0.000338	0.000422

(*) Sin dimensiones

En la Tabla 3-12 se resumen los correspondientes estadísticos hallados a partir de los datos experimentales especificados en la Tabla 3-11 Tomando todas las mediciones de las variables en un solo conjunto, sin realizar subdivisiones por tratamientos. Donde la única variable con distribución normal correspondió a Da (valor P de estadístico de Shapiro-Wilks > 0,05), todas las distribuciones fueron simétricas (-2 < asimetría < 2), excepto P y Yh, las cuales fueron simétricas al ser transformadas en Log P y 1/Yh.

Tabla 3-12: Propiedades de las variables medidas durante los tratamientos (n = 58).

Variable	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Coefficiente de variación (%)	Asimetría	Valor p de Shapiro - Wilk
Da	13297,8	467,49	14220,2	11964,5	3,51	-0,4164	0,6593
W	1,277	0,2248	1,72	0,85	17,60	-1,44	0,0018
FR/T	0,0565	0,0345	0,12	0,02	61,09	1,1761	3,36E-10
M-SPQ	0,567	0,0169	0,60	0,55	2,97	1,9914	2,252E-8
M-MP	0,098	0,0038	0,10	0,09	3,91	-1,7202	0,0024
Ha/Hm	6,211	0,1190	6,45	5,88	1,92	-0,5897	0,00002
MO	0,3414	0,1301	0,53	0,17	38,11	0,0861	3,04E-11

P	6033,47	3785,94	13786,7	1190,98	62,75	2,1880	2,796E-8
Log P	8,50686	0,644308	9,53146	7,08253	7,57	0,116753	0,0016
Yh	0,0000881	0,000094	0,00042	0,00002	106,59	6,3316	2,33E-15
1/Yh	22083,1	14026,7	50000,0	2370,0	63,52	1,15151	0,00051

Da (densidad aparente, N/m³); W (humedad gravimétrica, m³); FR/T (relación fragmentos de roca/tierra fina, N/N); M-SPQ (morfoloía por método SPQ); M-MP (morfoloía por método MP); Ha/Hm (relación dureza abrasivo/dureza herramienta); MO (contenido de materia orgánica, m³); P (consumo de potencia, N.m.s⁻¹); Yh (cantidad de desgaste en el tiempo de la herramienta, N.s⁻¹). Si valor P>0,05, la distribución es normal.

En la Tabla 3-13 se realizaron las correlaciones parciales de todas las variables dependientes e independientes referenciadas en la Tabla 3-11. Las correlaciones parciales miden la fuerza de la relación lineal entre las variables, considerando primero el ajuste por su relación con las otras variables de la tabla. Los valores P<0,05 (resaltados en negrilla) se consideran con alto nivel de correlación con un nivel de confianza del 95%. Por la razón que la única variable que se determinó por dos métodos diferentes fue la morfoloía de las partículas de suelos, en la tabla se especifica el momento en que se utilizó el método de puntas (SPQ) o el método de perímetros (MP).

Tabla 3-13: Correlaciones parciales de los resultados experimentales para las situaciones: todo el lote (M-SPQ), todo el lote (M-MP), suelo 1 y 2 (M-SPQ y M-MP).

(a) Todo el lote (M-SPQ). Tamaño de muestra: 58

	FR/T	Da	W	P	Ha/Hm	M	MO	Yh
FR/T		-0,1383	0,4074	0,2713	-0,1064	-0,4154	0,9448	0,7889
		0,3283	0,0027	0,0517	0,4528	0,0022	0,0000	0,0000
Da	-0,1383		0,1366	0,4326	-0,1333	0,0236	0,0375	0,2576
	0,3283		0,3342	0,0014	0,3463	0,8679	0,7917	0,0652
W	0,4074	0,1366		-0,6592	-0,3945	0,1805	-0,4470	-0,4645
	0,0027	0,3342		0,0000	0,0038	0,2003	0,0009	0,0005
P	0,2713	0,4326	-0,6592		-0,1033	-0,0404	-0,3142	-0,0775
	0,0517	0,0014	0,0000		0,4661	0,7763	0,0233	0,5850
Ha/Hm	-0,1064	-0,1333	-0,3945	-0,1033		0,0301	-0,0021	0,0271
	0,4528	0,3463	0,0038	0,4661		0,8321	0,9882	0,8486
M	-0,4154	0,0236	0,1805	-0,0404	0,0301		0,5389	0,5095
	0,0022	0,8679	0,2003	0,7763	0,8321		0,0000	0,0001
MO	0,9448	0,0375	-0,4470	-0,3142	-0,0021	0,5389		-0,6767
	0,0000	0,7917	0,0009	0,0233	0,9882	0,0000		0,0000
Yh	0,7889	0,2576	-0,4645	-0,0775	0,0271	0,5095	-0,6767	
	0,0000	0,0652	0,0005	0,5850	0,8486	0,0001	0,0000	

(b) Todo el lote (M-MP). Tamaño de muestra: 58

	FR/T	Da	W	P	Ha/Hm	M-MP	MO	Yh
FR/T		-0,1673	0,2454	0,2348	-0,2630	0,3060	0,9419	0,6836
		0,2357	0,0795	0,0939	0,0596	0,0274	0,0000	0,0000
Da	-0,1673		0,1243	0,4150	-0,1348	0,0407	0,0673	0,3104
	0,2357		0,3799	0,0022	0,3408	0,7747	0,6354	0,0251
W	0,2454	0,1243		-0,6937	-0,4779	0,3005	-0,3238	-0,4361
	0,0795	0,3799		0,0000	0,0003	0,0304	0,0192	0,0012
P	0,2348	0,4150	-0,6937		-0,1897	0,1992	-0,3356	-0,1229
	0,0939	0,0022	0,0000		0,1780	0,1569	0,0150	0,3855
Ha/Hm	-0,2630	-0,1348	-0,4779	-0,1897		0,5095	0,1298	0,0136
	0,0596	0,3408	0,0003	0,1780		0,0001	0,3589	0,9238
M-MP	0,3060	0,0407	0,3005	0,1992	0,5095		-0,2272	0,0566
	0,0274	0,7747	0,0304	0,1569	0,0001		0,1052	0,6903
MO	0,9419	0,0673	-0,3238	-0,3356	0,1298	-0,2272		-0,5266
	0,0000	0,6354	0,0192	0,0150	0,3589	0,1052		0,0001
Yh	0,6836	0,3104	-0,4361	-0,1229	0,0136	0,0566	-0,5266	
	0,0000	0,0251	0,0012	0,3855	0,9238	0,6903	0,0001	

(c) Suelo 1 (M-SPQ). Tamaño de muestra: 28

	M	FR/T	Da	W	P	Ha/Hm	MO	Yh
M		-0,5460	-0,1259	0,3010	0,5493	0,2984	0,4579	0,0039
		0,0086	0,5766	0,1735	0,0081	0,1774	0,0321	0,9863
FR/T	-0,5460		-0,1961	0,2740	0,3174	0,3359	0,7855	0,4342
	0,0086		0,3817	0,2172	0,1500	0,1264	0,0000	0,0435
Da	-0,1259	-0,1961		0,1717	0,3899	-0,1018	0,1129	0,1143
	0,5766	0,3817		0,4449	0,0729	0,6521	0,6170	0,6126
W	0,3010	0,2740	0,1717		-0,5052	-0,2736	-0,0301	-0,1474
	0,1735	0,2172	0,4449		0,0165	0,2180	0,8942	0,5128
P	0,5493	0,3174	0,3899	-0,5052		-0,4449	-0,0989	0,5144
	0,0081	0,1500	0,0729	0,0165		0,0380	0,6616	0,0143
Ha/Hm	0,2984	0,3359	-0,1018	-0,2736	-0,4449		-0,1388	0,2830
	0,1774	0,1264	0,6521	0,2180	0,0380		0,5378	0,2018
MO	0,4579	0,7855	0,1129	-0,0301	-0,0989	-0,1388		-0,3984
	0,0321	0,0000	0,6170	0,8942	0,6616	0,5378		0,0663
Yh	0,0039	0,4342	0,1143	-0,1474	0,5144	0,2830	-0,3984	
	0,9863	0,0435	0,6126	0,5128	0,0143	0,2018	0,0663	

(d) Suelo 2 (M-SPQ). Tamaño de muestra: 30

	M	FR/T	Da	W	P	Ha/Hm	MO	Yh
M		0,3092	-0,1239	-0,4041	-0,7897	0,5475	-0,2285	-0,1163
		0,1415	0,5642	0,0502	0,0000	0,0056	0,2829	0,5884
FR/T	0,3092		-0,1587	0,2186	0,5832	-0,6993	0,7253	0,3400
	0,1415		0,4590	0,3047	0,0028	0,0001	0,0001	0,1041
Da	-0,1239	-0,1587		0,0512	0,1426	0,1051	-0,1064	0,0910
	0,5642	0,4590		0,8123	0,5064	0,6249	0,6208	0,6724
W	-0,4041	0,2186	0,0512		-0,6254	0,0482	-0,4053	-0,5472
	0,0502	0,3047	0,8123		0,0011	0,8230	0,0494	0,0056
P	-0,7897	0,5832	0,1426	-0,6254		0,5227	-0,4590	-0,1311
	0,0000	0,0028	0,5064	0,0011		0,0088	0,0241	0,5415
Ha/Hm	0,5475	-0,6993	0,1051	0,0482	0,5227		0,7288	0,2834
	0,0056	0,0001	0,6249	0,8230	0,0088		0,0001	0,1796
MO	-0,2285	0,7253	-0,1064	-0,4053	-0,4590	0,7288		-0,5246
	0,2829	0,0001	0,6208	0,0494	0,0241	0,0001		0,0085
Yh	-0,1163	0,3400	0,0910	-0,5472	-0,1311	0,2834	-0,5246	
	0,5884	0,1041	0,6724	0,0056	0,5415	0,1796	0,0085	

(e) Suelo 1 (M-MP). Tamaño de muestra: 28

	M-MP	FR/T	Da	W	P	Ha/Hm	MO	Yh
M-MP		0,1949	-0,0663	0,2546	0,1511	0,1643	0,5945	0,1173
		0,3847	0,7694	0,2528	0,5022	0,4651	0,0035	0,6033
FR/T	0,1949		-0,1371	0,0806	-0,0052	0,1773	0,4511	0,4795
	0,3847		0,5430	0,7214	0,9815	0,4299	0,0351	0,0239
Da	-0,0663	-0,1371		0,1533	0,3916	-0,1340	0,0896	0,1214
	0,7694	0,5430		0,4957	0,0715	0,5522	0,6916	0,5904
W	0,2546	0,0806	0,1533		-0,4461	-0,2344	-0,0526	-0,1771
	0,2528	0,7214	0,4957		0,0374	0,2937	0,8162	0,4305
P	0,1511	-0,0052	0,3916	-0,4461		-0,3684	0,0736	0,5892
	0,5022	0,9815	0,0715	0,0374		0,0916	0,7449	0,0039
Ha/Hm	0,1643	0,1773	-0,1340	-0,2344	-0,3684		-0,0997	0,2724
	0,4651	0,4299	0,5522	0,2937	0,0916		0,6589	0,2200
MO	0,5945	0,4511	0,0896	-0,0526	0,0736	-0,0997		-0,4260
	0,0035	0,0351	0,6916	0,8162	0,7449	0,6589		0,0481
Yh	0,1173	0,4795	0,1214	-0,1771	0,5892	0,2724	-0,4260	
	0,6033	0,0239	0,5904	0,4305	0,0039	0,2200	0,0481	

(f) Suelo 2 (M-MP). Tamaño de muestra: 30

	M-MP	FR/T	Da	W	P	Ha/Hm	MO	Yh
M-MP		-0,4635	-0,3088	0,4612	0,5376	0,7276	-0,0217	0,1412
		0,0225	0,1421	0,0233	0,0067	0,0001	0,9199	0,5106
FR/T	-0,4635		-0,3190	0,2985	0,6834	-0,0675	0,6163	0,3478
	0,0225		0,1286	0,1566	0,0002	0,7540	0,0013	0,0959
Da	-0,3088	-0,3190		0,2365	0,4827	0,2540	-0,0836	0,1443
	0,1421	0,1286		0,2658	0,0169	0,2311	0,6979	0,5012
W	0,4612	0,2985	0,2365		-0,6563	-0,4731	-0,3018	-0,5488
	0,0233	0,1566	0,2658		0,0005	0,0195	0,1518	0,0055
P	0,5376	0,6834	0,4827	-0,6563		-0,2894	-0,3815	-0,1297
	0,0067	0,0002	0,0169	0,0005		0,1701	0,0659	0,5459
Ha/Hm	0,7276	-0,0675	0,2540	-0,4731	-0,2894		0,5240	0,0768
	0,0001	0,7540	0,2311	0,0195	0,1701		0,0086	0,7212
MO	-0,0217	0,6163	-0,0836	-0,3018	-0,3815	0,5240		-0,5068
	0,9199	0,0013	0,6979	0,1518	0,0659	0,0086		0,0115
Yh	0,1412	0,3478	0,1443	-0,5488	-0,1297	0,0768	-0,5068	
	0,5106	0,0959	0,5012	0,0055	0,5459	0,7212	0,0115	

Correlación

Valor-P

(P < 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con nivel de confianza del 95,0%)

Los siguientes pares de variables tienen valores $P < 0,05$, con alto nivel de correlación parcial:

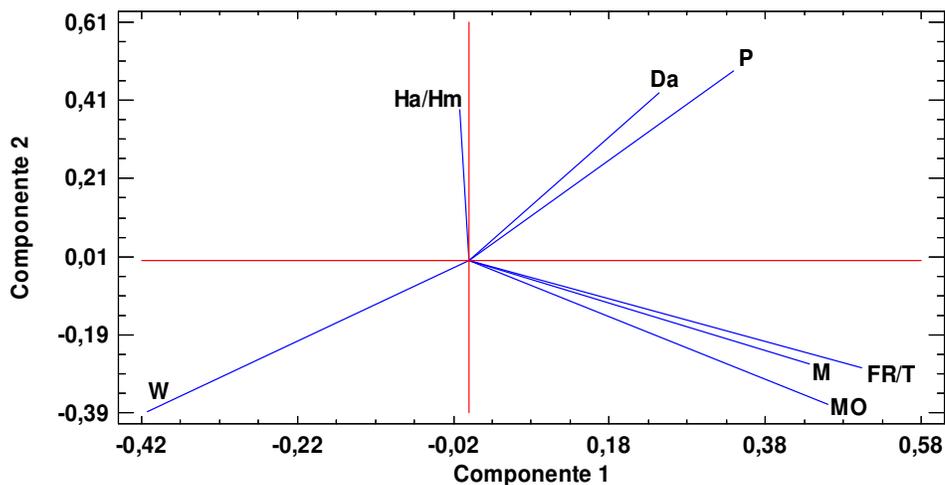
- (1) En todo el lote (M-SPQ): FR/T y W; FR/T y M; FR/T y MO; FR/T y Yh; Da y P; W y P; W y Ha/Hm; W y MO; W y Yh; P y MO; M y MO; M y Yh; MO y Yh.
- (2) En todo el lote (M-MP): FR/T y M-MP; FR/T y MO; FR/T y Yh; Da y P; Da y Yh; W y P; W y Ha/Hm; W y M-MP; W y MO; W y Yh; P y MO; Ha/Hm y M-MP; MO y Yh
- (3) Suelo 1 (M-SPQ): M y FR/T; M y P; M y MO; FR/T y MO; FR/T y Yh; W y P; P y Ha/Hm; P y Yh.
- (4) Suelo 2 con M-SPQ: M y P; M y Ha/Hm; FR/T y P; FR/T y Ha/Hm; FR/T y MO; W y P; W y MO; W y Yh; P y Ha/Hm; P y MO; Ha/Hm y MO; MO y Yh.
- (5) Suelo 1 (M-MP): M-MP y MO; FR/T y MO; FR/T y Yh; W y P; P y Yh; MO y Yh.
- (6) Suelo 2 (M-MP): M-MP y FR/T; M-MP y W; M-MP y P; M-MP y Ha/Hm; FR/T y P; FR/T y MO; Da y P; W y P; W y Ha/Hm; W y Yh.

De acuerdo a los seis casos anteriores, se destaca:

- Siempre se presentó correlación alta entre FR/T y MO, y W y P
- No se presentaron correlaciones entre Yh con Ha/Hm y M-MP.
- Número de veces que Yh correlacionó con las variables: MO (5); FR/T (4); W (4); P (2); y una vez con M-SPQ y Da.

Por otro lado, con la técnica de componentes principales se puede visualizar el comportamiento de las variables, su peso y dirección de sus vectores. Para todas las variables y mediciones de morfología realizadas por M-SPQ, obsérvese que en la Figura 3-9 los vectores Da y P tienen dirección contraria a W, con lo que se verifica el comportamiento inverso que se presenta entre las variables W con Da y P.

Figura 3-9: Componentes principales del suelo de Cotové respecto a las variables consideradas para el desarrollo de los modelos.



En la Figura 3-10 se presentan los diagramas de barras para cada uno de los tratamientos. En cada tratamiento (E_{ij}), i corresponde a la velocidad de operación (tres niveles, 1, 2 y 3, ó 2, 3 y 4 km/h respectivamente) y j al tipo de suelo (dos niveles, 1 y 2, franco arcilloso y franco limoso respectivamente). En la Tabla 3-14 se observan los principales estadísticos de cada una de las variables seleccionadas en el modelo de abrasividad de acuerdo a cada tratamiento E_{ij} . En la Tabla 3-15 se determina la ANOVA de los estadísticos respectivos y en la Tabla 3-16 se comparan los diferentes tratamientos.

Figura 3-10: Mapas del comportamiento de cada una de las variables en los diferentes tratamientos. E_{ij} indica tipo de tratamiento, i la velocidad (1, 2 y 3, corresponde a 2, 3 y 4 km/h, respectivamente) y j tipo de suelo (1 y 2, corresponde a franco arcilloso y franco limoso, respectivamente). Las barras oscuras indican suelo franco arcilloso, y las barras claras suelo franco limoso.

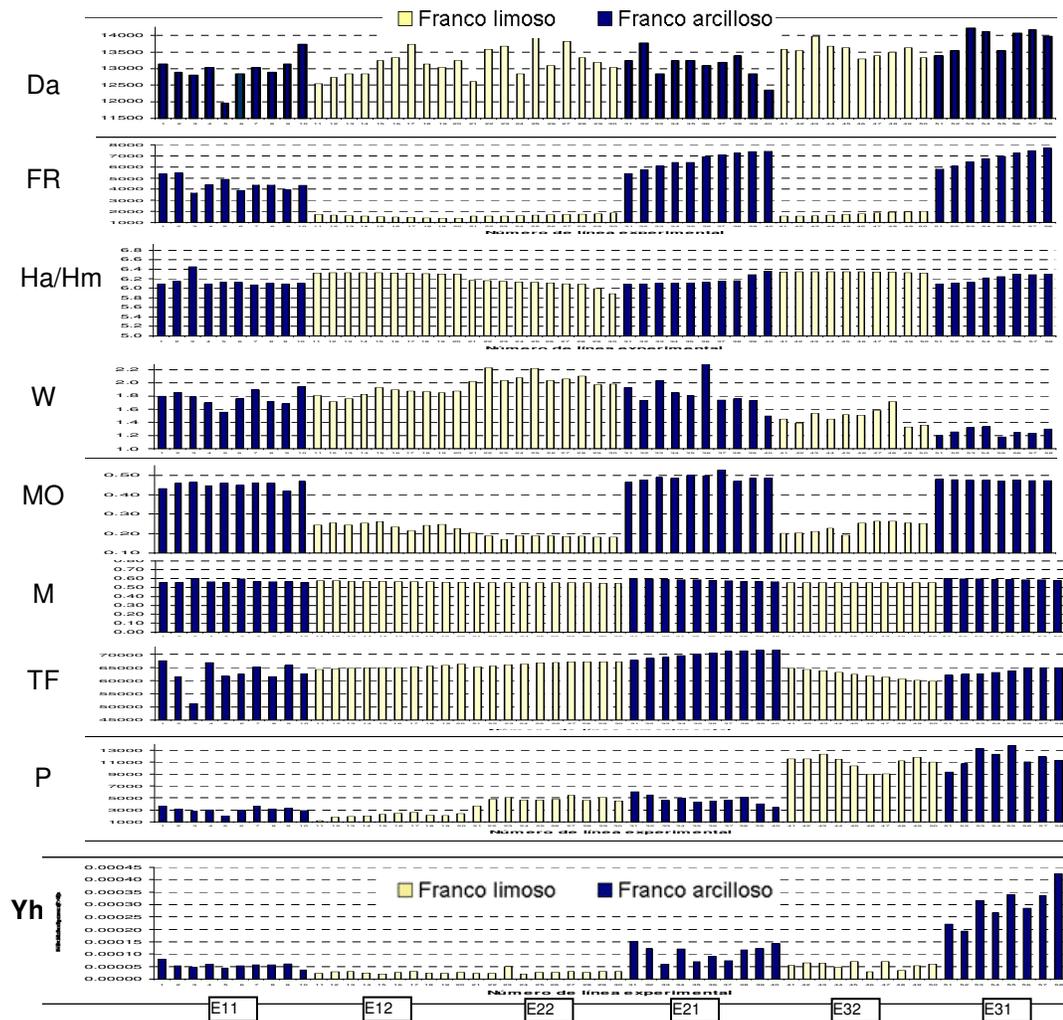


Tabla 3-14: Principales estadísticos de las variables medidas o calculadas en cada tratamiento.

(a) Densidad aparente (Da)

Tratamiento	Estadísticos de densidad aparente (Da) (N m ⁻³)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	12950.10	435.80200	3.4	11964.5	13729.8	12847.2	13141.4	-1.02	2.3	0.062
E12	10	13072.70	339.88200	2.6	12553.0	13729.8	12847.2	13239.5	0.52	0.2	0.890
E22	10	13327.70	460.45400	3.5	12602.0	14073.0	13043.3	13680.8	0.12	-0.5	0.982
E21	10	13121.80	377.85000	2.9	12356.8	13778.8	12847.2	13239.5	-0.60	1.0	0.468
E32	10	13553.30	199.11400	1.5	13288.5	13975.0	13386.6	13631.7	1.01	0.8	0.534
E31	8	13876.90	335.65600	2.4	13386.6	14220.2	13533.7	14146.6	-0.64	-1.1	0.082

(b) Humedad gravimétrica (W)

Tratamiento	Estadísticos de humedad gravimétrica del suelo (W) (m ³)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	1.77	0.11580	6.5	1.6	1.9	1.7	1.9	-0.44	0.0	0.952
E12	10	1.84	0.06667	3.6	1.7	1.9	1.8	1.9	-1.01	0.1	0.669
E22	10	2.07	0.08883	4.3	2.0	2.2	2.0	2.1	1.32	0.0	0.074
E21	10	1.84	0.20837	11.3	1.5	2.3	1.7	1.9	1.04	1.2	0.304
E32	10	1.48	0.11654	7.9	1.3	1.7	1.4	1.5	0.85	0.3	0.697
E31	8	1.26	0.05471	4.3	1.2	1.3	1.2	1.3	-0.02	-0.5	0.913

(c) Tierra fina (T)

Tratamiento	Estadísticos tierra fina (T) (N)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	62697.9	4596.3	7.3	51336.6	67598.4	61590.4	65834.1	-2.28	2.8	0.018
E12	10	65123.2	617.8	0.9	64262.1	66282.2	64718.7	65523.5	0.75	-0.1	0.863
E22	10	66503.0	735.3	1.1	65111.2	67138.0	65945.5	67110.3	-1.23	-0.3	0.051
E21	10	70119.4	1411.2	2.0	67704.4	71605.6	69032.2	71442.3	-0.66	-0.7	0.296
E32	10	62171.3	1756.8	2.8	59745.7	64741.8	60604.8	63724.6	0.09	-0.9	0.736
E31	8	63634.0	1222.8	1.9	62046.1	65034.1	62595.9	64973.7	0.13	-1.1	0.185

(d) Fragmentos de roca (FR)

Tratamiento	Estadísticos de fragmentos de roca (FR) (N)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	4472.5	607.0	13.6	3651.5	5459.3	3945.5	4878.1	0.69	-0.4	0.351
E12	10	1503.9	118.2	7.9	1356.3	1701.0	1402.2	1596.0	0.51	-0.7	0.675
E22	10	1661.4	99.7	6.0	1555.3	1842.3	1572.6	1730.5	0.88	-0.4	0.355
E21	10	6625.7	710.5	10.7	5419.3	7440.8	6098.8	7275.3	-0.59	-0.7	0.427
E32	10	1754.1	156.6	8.9	1565.0	2006.5	1612.1	1905.5	0.45	-0.9	0.505
E31	8	6813.2	660.4	9.7	5830.1	7694.8	6270.5	-0.7	-0.24	-0.7	0.879

(e) Materia orgánica (MO)

Tratamiento	Estadísticos de materia orgánica (MO) (m ³)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	0.45	0.01549	3.4	0.4	0.5	0.5	0.5	-1.69	0.6	0.021
E12	10	0.24	0.01317	5.4	0.2	0.3	0.2	0.3	-0.11	-0.5	0.585
E22	10	0.19	0.00843	4.5	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.50	0.2	0.155
E21	10	0.49	0.01912	3.9	0.5	0.5	0.5	0.5	1.00	1.1	0.482
E32	10	0.23	0.02749	12.0	0.2	0.3	0.2	0.3	-0.41	-1.2	0.077
E31	8	0.48	0.00518	1.1	0.5	0.5	0.5	0.5	-0.74	-1.3	0.001

(f) Dureza de partículas de suelo (Ha)

Tratamiento	Estadísticos de dureza de las partículas de suelo (Ha) (kg/mm ²)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	706.47	12.50	1.8	699.2	741.4	700.7	705.3	3.81	5.8	0.0000
E12	10	707.62	1.19	0.2	705.2	708.7	706.9	708.5	-1.51	0.2	0.0531
E22	10	700.48	10.10	1.4	676.6	709.2	700.1	707.0	-2.33	2.0	0.0101
E21	10	708.38	10.51	1.5	700.3	731.8	701.8	708.5	2.22	1.3	0.0033
E32	10	710.22	1.06	0.1	708.0	711.3	709.7	711.2	-1.36	0.4	0.1851
E31	8	720.43	9.88	1.4	707.6	731.0	710.1	729.7	-0.35	-1.2	0.1305

(g) Morfología de partículas de suelo (métodos: puntas y perímetros)

Tratamiento	Estadísticos de morfología de las partículas - Método de puntas (SPQ)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	0.57	0.01595	2.8	0.6	0.6	0.6	0.6	1.86	0.4	0.0010
E12	10	0.57	0.00516	0.9	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.63	-1.5	0.0003
E22	10	0.55	0.00000	0.0	0.6	0.6	...	...	...	...	...
E21	10	0.58	0.01247	2.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.00	-0.6	0.5495
E32	10	0.55	0.00000	0.0	0.6	0.6	...	...	...	...	...
E31	8	0.59	0.00756	1.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.00	-0.4	0.0963

Tratamiento	Estadísticos de morfología de las partículas - Método de perímetros (MP)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	0.09	0.00422	4.6	0.1	0.1	0.1	0.1	2.30	0.9	0.0000
E12	10	0.10	0.00000	0.0	0.1	0.1	...	...	...	...	...
E22	10	0.10	0.00422	4.3	0.1	0.1	0.1	0.1	-2.30	0.9	0.0000
E21	10	0.10	0.00000	0.0	0.1	0.1	...	...	...	...	...
E32	10	0.10	0.00000	0.0	0.1	0.1	...	...	...	...	...
E31	8	0.10	0.00000	0.0	0.1	0.1	...	...	...	...	...

(h) Potencia consumida (P)

Tratamiento	Estadísticos de consumo de potencia (P) (N m s ⁻¹)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	8.97	0.32338	3.6	8.3	9.3	8.9	9.2	-1.65	0.6	0.053
E12	10	4.81	0.27893	5.8	4.3	5.2	4.6	5.0	-0.90	0.1	0.741
E22	10	3.69	0.16932	4.6	3.4	4.0	3.6	3.8	-0.23	1.6	0.212
E21	10	9.69	0.34959	3.6	9.2	10.5	9.5	9.9	1.36	1.4	0.353
E32	10	4.61	0.56028	12.2	3.8	5.2	4.0	5.1	-0.33	-1.3	0.071
E31	8	9.44	0.05757	0.6	9.4	9.5	9.4	9.5	0.31	-0.5	0.941

(i) Pérdida de peso de las herramientas (Yh)

Tratamiento	Estadísticos de pérdida de peso (Yh) (N s ⁻¹)										
	n	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p
E11	10	0.00006	0.00001	19.2	0.00004	0.00008	0.00005	0.00006	1.32	1.5	0.0778
E12	10	0.00003	0.00001	19.9	0.00002	0.00003	0.00002	0.00003	-0.63	-1.5	0.0003
E22	10	0.00003	0.00001	30.2	0.00002	0.00005	0.00002	0.00003	1.89	2.3	0.0030
E21	10	0.00011	0.00003	29.6	0.00006	0.00015	0.00007	0.00012	-0.35	-0.9	0.2110
E32	10	0.00006	0.00001	23.1	0.00003	0.00007	0.00005	0.00006	-1.05	0.2	0.2292
E31	8	0.00030	0.00007	24.5	0.00019	0.00042	0.00025	0.00034	0.07	-0.1	0.9236

Q1: Cuartil inferior; Q2: Cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación; S: sesgo; K: kurtosis; n: No. de líneas.
Si valor p > 0,05 de Shapiro-Wilk, se considera que la distribución de datos de la variable es normal.

Tabla 3-15: Análisis de varianza con prueba de rangos múltiples LSD para cada relación de tratamientos

- Densidad aparente (Da) (N/m³)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	5,369663E6	5	1,07393E6	7,88	0,0000
Dentro del grupo	7,08755E6	52	136299,0		
Total (Corr.)	1,24572E7	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E11	10	12950.1	XX
E12	10	13072.7	XX
E21	10	13121.8	XXX
E22	10	13327.7	XX
E32	10	13553.3	XX
E31	8	13876.9	X

- Humedad gravimétrica del suelo (W) (m³)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	2,49051	5	0,498101	69,79	0,0000
Dentro del grupo	0,371136	52	0,00713723		
Total (Corr.)	2,86164	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E31	8	0.890206	X
E32	10	1.07012	X
E11	10	1.34592	X
E21	10	1.37415	X
E12	10	1.37918	X
E22	10	1.52587	X

- Relación dureza de partículas de suelo/dureza de herramienta (Ha/Hm)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	0,500019	5	0,100004	17,13	0,0000
Dentro del grupo	0,30361	52	0,00583866		
Total (Corr.)	0,803629	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E22	10	6.09116	X
E11	10	6.14323	XX
E21	10	6.1598	X
E31	8	6.21057	X
E12	10	6.31808	X
E32	10	6.34123	X

- Morfología de partículas de suelos (M) (M-SPQ)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	0,0112389	5	0,00224777	27,96	0,0000
Dentro del grupo	0,00417971	52	0,0000803791		
Total (Corr.)	0,0154186	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
32	10	0.551349	X
22	10	0.551378	X
12	10	0.566071	X
11	10	0.568938	X
21	10	0.580845	XX
31	8	0.590439	X

- Morfología de partículas de suelos (M) (MP)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	0,000735221	5	0,000147044	70,10	0,0000
Dentro del grupo	0,000109082	52	0,00000209774		
Total (Corr.)	0,000844303	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E11	10	0.0926284	X
E22	10	0.0967586	X
E12	10	0.0983066	X
E32	10	0.0985663	X
E31	8	0.102425	X
E21	10	0.103364	X

- Contenido de material orgánica (MO) (m³)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	0,941504	5	0,188301	661,98	0,0000
Dentro del grupo	0,0147915	52	0,000284451		
Total (Corr.)	0,956296	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E22	10	0.186001	X
E32	10	0.232243	X
E12	10	0.242273	X
E11	10	0.452138	X
E31	8	0.475682	XX
E21	10	0.488275	X

- Potencia (P) (N.m.s⁻¹)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	7,80757E8	5	1,56151E8	224,04	0,0000
Dentro del grupo	3,62434E7	52	696989,0		
Total (Corr.)	8,17E8	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E12	10	2086.57	X
E11	10	3063.07	X
E22	10	4736.7	X
E21	10	4754.15	X
E32	10	10950.7	X
E31	8	11753.8	X

- Relación fragmentos de roca / Tierra fina (FR/T)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	0,0659358	5	0,0131872	348,79	0,0000
Dentro del grupo	0,00196602	52	0,0000378081		
Total (Corr.)	0,0679018	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E12	10	0.0231098	X
E22	10	0.0249721	X
E32	10	0.0282976	X
E11	10	0.0714144	X
E21	10	0.0943422	X
E31	8	0.106933	X

- Pérdida de peso de la herramienta (Yh) (N.s⁻¹)

Origen	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
Entre grupos	4,53315E-7	5	9,0663E-8	94,71	0,0000
Dentro del grupo	4,97794E-8	52	9,57295E-10		
Total (Corr.)	5,03094E-7	57			

Método: 95.0 porciento LSD

Tratamiento	Conteo	Media	Grupos homogéneos
E12	10	0.0000257263	X
E22	10	0.0000284241	XX
E32	10	0.0000549006	X
E11	10	0.0000554015	X
E21	10	0.000107808	X
E31	8	0.000298219	X

3.2.1 Comparaciones entre los tratamientos E_{ij}

Los resultados de la Tabla 3-15 se resumen en la Tabla 3-16 con los valores medios de las variables y la comparación entre variables de dos tratamientos diferentes (sea E_{ij}, i: velocidad 1, 2, 3, que corresponde a 2, 3 y 4 km/h, respectivamente; j: tipo de suelo, 1 (franco arcilloso), 2 (franco limoso)), en el primer subgrupo se presentan relaciones con velocidades iguales y suelos diferentes, el segundo subgrupo con suelos iguales y velocidades diferentes, y un tercer subgrupo con velocidades y suelos diferentes. Las celdas resaltadas en color gris, corresponden a pares de variables con diferencias estadísticas significativas. En todos los casos, para un par determinado, con la variable

más abrasiva en el numerador y la menos abrasiva en el denominador (de acuerdo a los resultados de campo de Yh en cada tratamiento), representando cuantitativamente la cantidad adimensional que determinada variable supera a la variable de otro tratamiento. En la columna de la derecha se expresa la variación en % del tratamiento en el numerador respecto al tratamiento en el denominador.

Tabla 3-16: Comparaciones entre tratamientos (las casillas sombreadas presentan diferencias estadísticas significativas).

(a) Velocidades (v) iguales y suelos (s) diferentes

Variable o parámetro	Relación entre tratamientos													
	E12		E11	E11/E12	Variación E11 respecto E12 (%)	E22		E21	E21/E22	Variación E21 respecto E22 (%)	E32	E31	E31/E32	Variación E31 respecto E32 (%)
	2 km/h		3 km/h			4km/h								
Da (N/m ³)	13072.7	12950.1			13327.7	13121.8					13553.3	13876.9		
Ha/Hm (---)	6.32	6.14	0.97/1	-3	6.09	6.16					6.34	6.21	0.98/1	-2
W (m ³)	1.38	1.35			1.53	1.37	0.90/1	-10			1.07	0.89	0.83/1	-17
M (---) spq	0.57	0.57			0.55	0.58	1.05/1	5			0.55	0.59	1.07/1	7
MO (m ³)	0.24	0.45	1.87/1	87	0.19	0.49	2.63/1	163			0.23	0.48	2.05/1	105
P (N.m/s)	2086.6	3063.1	1.47/1	47	4736.7	4754.1					10950.7	11753.8		
FR/T	0.02	0.07	3.09/1	209	0.02	0.09	3.78/1	278			0.03	0.11	3.78/1	278
Yh (N/s)	0.00003	0.00006	2.15/1	115	0.00003	0.00011	3.79/1	279			0.00005	0.00030	5.43/1	443
M (---) Mp	0.10	0.09	0.94/1	-6	0.10	0.10	1.07/1	7			0.10	0.10	1.04/1	4

(b) Velocidades (v) diferentes y suelos (s) iguales

Variable o parámetro	Relación entre tratamientos											
	E11	E21	E21/E11	Variación E21 respecto E11 (%)	E11	E31	E31/E11	Variación E31 respecto E11 (%)	E21	E31	E31/E21	Variación E31 respecto E21 (%)
	Suelo 1				Suelo 1				Suelo 1			
Da (N/m ³)	12950.1	13121.8			12950.1	13876.9	1.07/1	7	13121.8	13876.9	1.06/1	6
Ha/Hm (---)	6.14	6.16			6.14	6.21			6.16	6.21		
W (m ³)	1.35	1.37			1.35	0.89	0.66/1	-34	1.37	0.89	0.65/1	-35
M (---) spq	0.57	0.58			0.57	0.59	1.04/1	4	0.58	0.59		
MO (m ³)	0.45	0.49	1.08/1	8	0.45	0.48			0.49	0.48		
P (N.m/s)	3063.1	4754.1	1.55/1	55	3063.1	11753.8	3.84/1	284	4754.1	11753.8	2.47/1	147
FR/T	0.07	0.09	1.32/1	32	0.07	0.11	1.50/1	50	0.09	0.11		
Yh (N/s)	0.00006	0.00011	1.95/1	95	0.00006	0.00030	5.38/1	438	0.00011	0.00030	2.77/1	177
M (---) Mp	0.09	0.10	1.12/1	12	0.09	0.10	1.11/1	11	0.10	0.10		

Variable o parámetro	Relación entre tratamientos											
	E12	E22	E22/E12	Variación E22 respecto E12 (%)	E12	E32	E32/E12	Variación E32 respecto E12 (%)	E22	E32	E32/E22	Variación E32 respecto E22 (%)
	Suelo 2				Suelo 2				Suelo 2			
Da (N/m ³)	13072.7	13327.7			13072.7	13553.3	1.04/1	4	13327.7	13553.3		
Ha/Hm (---)	6.32	6.09	0.96/1	-4	6.32	6.34			6.09	6.34	1.04/1	4
W (m ³)	1.38	1.53	1.11/1	11	1.38	1.07	0.78/1	-22	1.53	1.07	0.70/1	-30
M (---) spq	0.57	0.55	0.97/1	-3	0.57	0.55	0.97/1	-3	0.55	0.55		
MO (m ³)	0.24	0.19	0.77/1	-23	0.24	0.23			0.19	0.23	1.25/1	25
P (N.m/s)	2086.6	4736.7	2.27/1	127	2086.6	10950.7	5.25/1	425	4736.7	10950.7	2.31/1	131
FR/T	0.02	0.02			0.02	0.03			0.02	0.03		
Yh (N/s)	0.00003	0.00003			0.00003	0.00005	2.13/1	113	0.00003	0.00005	1.93/1	93
M (---) Mp	0.10	0.10	0.98/1	-2	0.10	0.10			0.10	0.10	1.02/1	2

(c) Velocidades y suelos diferentes

Variable	Relación entre tratamientos (v diferentes y s diferentes)					
	E11/E22	E11/E32	E21/E12	E31/E12	E21/E32	E31/E22
Da (N.m ⁻³)	0.97/1	0.96/1	1.00/1	1.06/1	0.97/1	1.04/1
Ha/Hm (---)	1.01/1	0.97/1	0.97/1	0.98/1	0.97/1	1.02/1
W (m ³)	0.88/1	1.26/1	1.00/1	0.65/1	1.28/1	0.58/1
M-SPQ (---)	1.03/1	1.03/1	1.03/1	1.04/1	1.05/1	1.07/1
MO (m ³)	2.43/1	1.95/1	2.02/1	1.96/1	2.10/1	2.56/1
P (N.m.s ⁻¹)	0.65/1	0.28/1	2.28/1	5.63/1	0.43/1	2.48/1
FR/T	2.86/1	2.52/1	4.08/1	4.63/1	3.33/1	4.28/1
Yh (N.s ⁻¹)	1.95/1	1.01/1	4.19/1	11.59/1	1.96/1	10.49/1

Nota. Sea el tratamiento E_{ij}, donde i: velocidad 1, 2, 3, que corresponde a 2, 3 y 4 km/h, respectivamente; j: tipo de suelo, 1 (franco arcilloso), 2 (franco limoso).

En la Tabla 3-17 se resumen el resultado de las variables en las relaciones entre tratamientos, aquellas relaciones que no dieron significativas se considera que su valor es la unidad, al ser estadísticamente iguales. En la Tabla 3-18 se presentan las correlaciones al relacionar las variables entre tratamientos.

Tabla 3-17: Relaciones entre tratamientos E_{ij} (más abrasivo/menos abrasivo) y resultado de las variables en las relaciones entre tratamientos

Relación entre tratamientos	Comportamiento de las variables en relaciones entre tratamientos							
	Da_n/Da_d	$(Ha/Hm)_n/(Ha/Hm)_d$	W_n/W_d	$M-SPQ_n/M-SPQ_d$	MO_n/MO_d	P_n/P_d	$(FR/T)_n/(FR/T)_d$	Yh_n/Yh_d
E11/E12	1.00	0.97	1.00	1.00	1.87	1.47	3.09	2.15
E21/E22	1.00	1.00	0.90	1.05	2.63	1.00	3.78	3.79
E31/E32	1.00	0.98	0.83	1.07	2.05	1.00	3.78	5.43
E21/E11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.08	1.55	1.32	1.95
E31/E11	1.07	1.00	0.66	1.04	1.00	3.84	1.50	5.38
E31/E21	1.06	1.00	0.65	1.00	1.00	2.47	1.00	2.77
E22/E12	1.00	0.96	1.11	0.97	0.77	2.27	1.00	1.00
E32/E12	1.04	1.00	0.78	0.97	1.00	5.25	1.00	2.13
E32/E22	1.00	1.04	0.70	1.00	1.25	2.31	1.00	1.93
E11/E22	1.00	1.00	0.88	1.03	2.43	0.65	2.86	1.95
E11/E32	0.96	0.97	1.26	1.03	1.95	0.28	2.52	1.00
E21/E12	1.00	0.97	1.00	1.03	2.02	2.28	4.08	4.19
E31/E12	1.06	0.98	0.65	1.04	1.96	5.63	4.63	11.59
E21/E32	1.00	0.97	1.28	1.05	2.10	0.43	3.33	1.96
E31/E22	1.04	1.02	0.58	1.07	2.56	2.48	4.28	10.49

E_{ij} , i: velocidad 1, 2, 3, corresponde a 2, 3 y 4 km/h, respectivamente; j: tipo de suelo, 1 (franco arcilloso), 2 (franco limoso). Da (densidad aparente); Ha/Hm (relación de durezas partículas/herramienta); W (humedad del suelo); $M-SPQ$ (morfología por método SPQ); MO (materia orgánica); P (potencia); FR/T (fragmentos de roca/tierra fina); Yh (pérdida de peso de herramienta).

Subíndice n: variable del tratamiento E_{ij} situada en el denominador

Subíndice d: variable del tratamiento E_{ij} situada en el numerador

Tabla 3-18: Correlaciones parciales del comportamiento de las variables en las relaciones entre tratamientos.

	Da_n/Da_d	$(Ha/Hm)_n/(Ha/Hm)_d$	W_n/W_d	$M-SPQ_n/M-SPQ_d$	MO_n/MO_d	P_n/P_d	$(FR/T)_n/(FR/T)_d$	Yh_n/Yh_d
Da_n/Da_d		-0,4814	-0,5698	0,4196	0,1666	0,4798	-0,3613	0,1151
$(Ha/Hm)_n/(Ha/Hm)_d$	-0,4814		-0,6552	0,2655	0,6250	0,2183	-0,7012	0,2241
W_n/W_d	-0,5698	-0,6552		0,2493	0,0791	0,1177	-0,1112	-0,2731
$M-SPQ_n/M-SPQ_d$	0,4196	0,2655	0,2493		-0,0257	-0,6850	0,2086	0,3912
MO_n/MO_d	0,1666	0,6250	0,0791	-0,0257		-0,2996	0,8919	-0,4465
P_n/P_d	0,4798	0,2183	0,1177	-0,6850	-0,2996		0,2729	0,3454
$(FR/T)_n/(FR/T)_d$	-0,3613	-0,7012	-0,1112	0,2086	0,8919	0,2729		0,6096
Yh_n/Yh_d	0,1151	0,2241	-0,2731	0,3912	-0,4465	0,3454	0,6096	

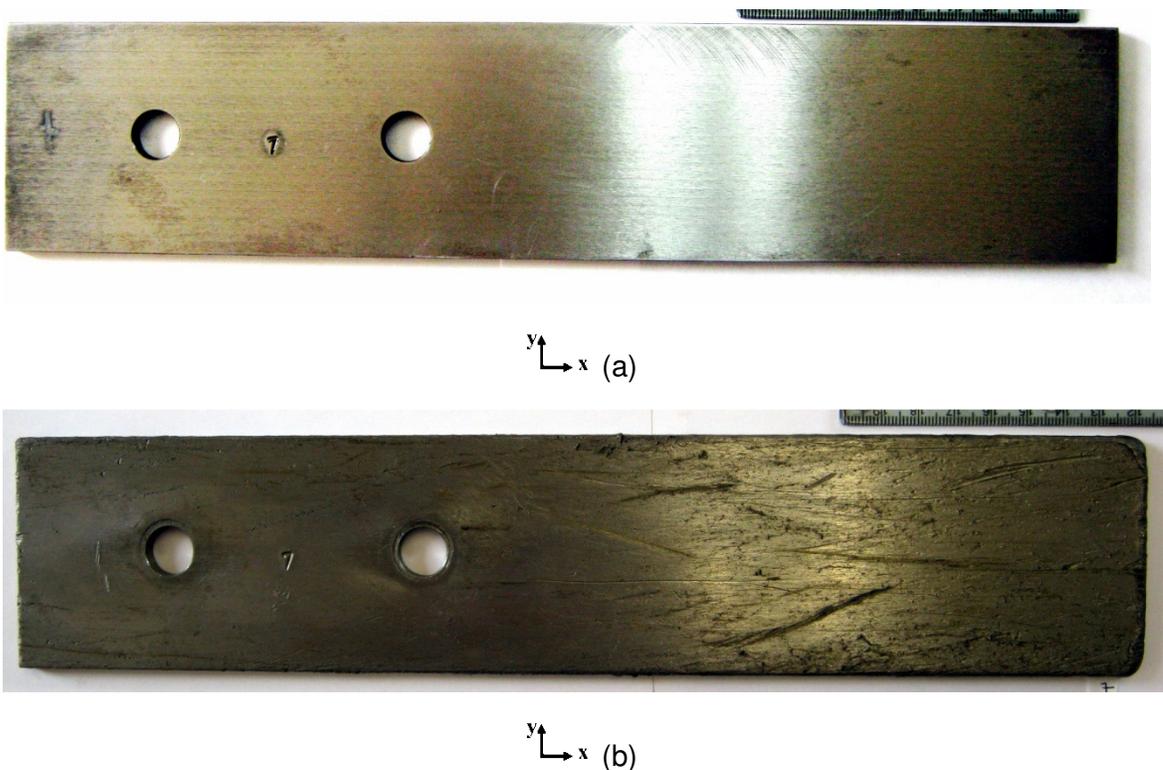
De acuerdo a la Tabla 3-18 se tiene el siguiente orden de correlación parcial respecto a la relación Yh_n/Yh_d de mayor a menor: $(FR/T)_n/(FR/T)_d$ (0,6096); MO_n/MO_d (-0,4465); $M-SPQ_n/M-SPQ_d$ (0,3912%); P_n/P_d (0,3454); W_n/W_d (-0,2731); $(Ha/Hm)_n/(Ha/Hm)_d$ (0,2241); Da_n/Da_d (0,1151). Como para todos los casos de la Tabla 3-16 la variable Yh del tratamiento más abrasivo se colocó en el numerador y la del menos abrasivo en el denominador, en los resultados de las correlaciones parciales la relación de variables que mejor explica el aumento o disminución de la relación Yh_n/Yh_d son las relaciones de

FR/T, hasta llegar a las relaciones de Da_n/Da_d , que son las de menor efecto (análisis similares se pueden hacer para las relaciones intermedias).

3.2.2 Influencia de las propiedades del suelo sobre el desgaste de la herramienta

En la Figura 3-11 se presenta el aspecto típico de una herramienta desgastada luego de los experimentos controlados. El desgaste de la herramienta P7 se presenta en una alta proporción en su extremo, con el redondeo característico que Moore (1975) también reporta en sus experimentos de campo, donde utilizó herramientas similares. En la superficie de la herramienta son visibles múltiples surcos característicos de desgaste a dos cuerpos, muchos de los cuales tienen varios centímetros de longitud. Adicionalmente hay tendencia a incrustación de partículas dentro del metal, que posiblemente fueron retiradas cuando la herramienta se sometió a procesos de lavado con el objeto de determinar pérdidas de peso.

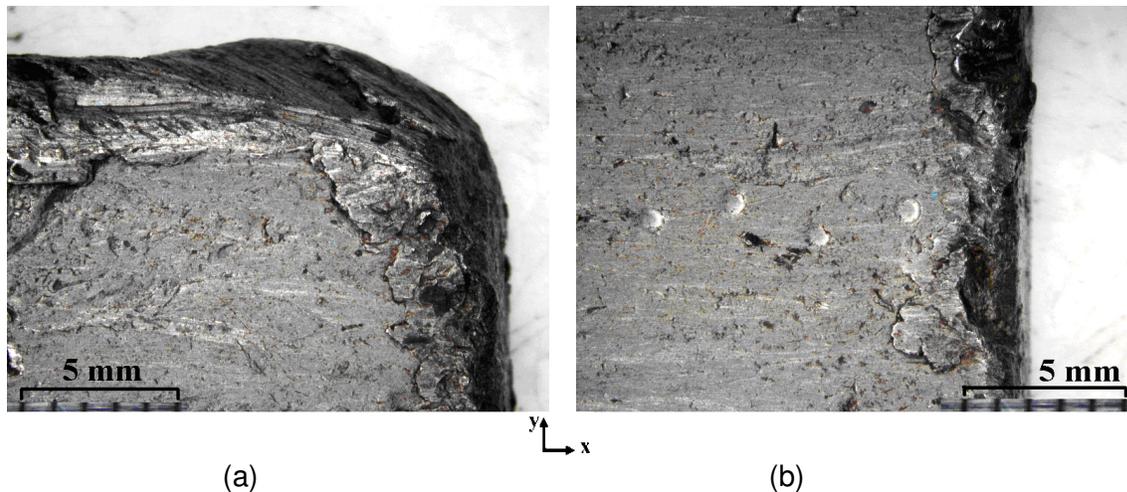
Figura 3-11: Herramientas (P7), (a) antes de experimentos, (b) luego de experimentos de campo (280 m recorridos), redondeo en los dos vértices extremos de la derecha.



El desgaste de la herramienta se caracterizó por tener sectores con deformación plástica, con alta presencia en la parte inferior de la herramienta y en la superficie que se

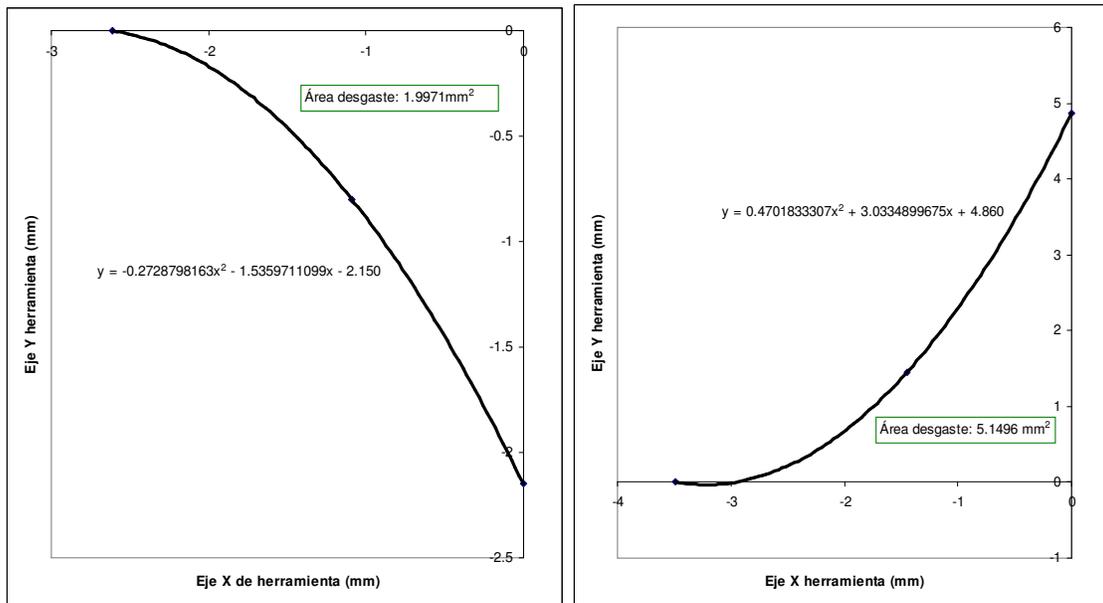
encontraba en contacto directo con el suelo (en la Figura 3-11 corresponde a las áreas extremas del eje x con alta concentración de surcos, y en cada vértice extremo del eje x con inicio de redondeo). En la Figura 3-12 se observan imágenes registradas con estereoscopio, con deformación plástica en uno de los vértices inferiores y en el extremo inferior de la herramienta.

Figura 3-12: Aspecto de la superficie de desgaste de la herramienta P5: (a) vértice inferior izquierdo, con deformación plástica y presencia de algunos surcos; (b) extremo inferior, con desprendimiento de material, deformación plástica y surcos de desgaste.

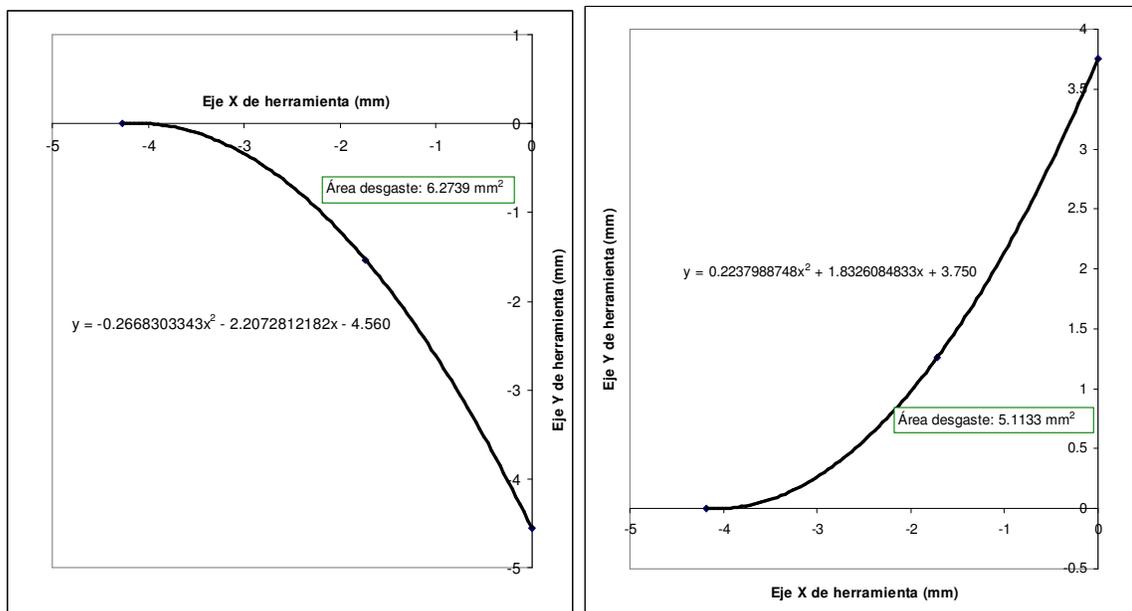


Aunque el desgaste de la herramienta se cuantificó midiendo secuencialmente la pérdida de peso, se consideró pertinente medir las áreas de redondeo, sin determinar pérdidas de volumen por redondeo, por el hecho que los espesores de las seis herramientas fueron homogéneos y eventualmente sería posible extrapolar su equivalente en volumen (ver Tabla 3-19, donde con la prueba LSD se verifica que los espesores son homogéneos para todas las herramientas). Pero como las herramientas se trabajaron sólo en una longitud total de 280 m, aquellas que roturaron el suelo 2 no presentaron la misma magnitud de redondeo que se observó en las herramientas que roturaron el suelo 1. En la Figura 3-14 se puede verificar visualmente que las herramientas P9, P12 y P6 son prácticamente rectas en sus vértices, algunas con pequeñas deformaciones, pero se observó que las deformaciones y un pequeño redondeo en algunas no era constante en todo su espesor. Por lo anterior se decidió sólo medir el redondeo para las tres herramientas que laboraron en el suelo 1 (P3, P7 y P5). Para cuantificar el redondeo se procedió a registrar medidas con un calibrador, las cuales se proyectaron en un plano (x,y), determinándose la ecuación de tendencia de los puntos periféricos hallados, y con el programa Matlab se determinó el área perdida por efecto del desgaste (ver Figura 3-13). Es importante especificar que en la Figura 3-13 los ejes (x,y) tienen dirección igual a los ejes especificados en la Figura 3-11, pero para facilitar la medición de las áreas de desgaste, se asignó un sistema de coordenadas, que en cada figura correspondió a cada uno de los vértices.

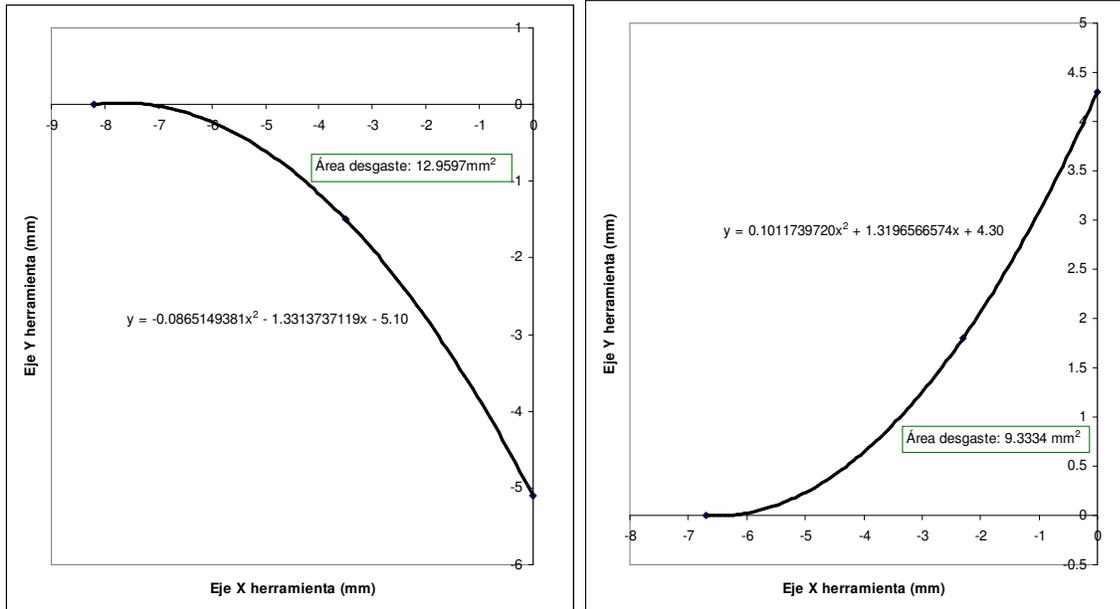
Figura 3-13: Ecuaciones de tendencia de la periferia de cada vértice de la herramienta luego de los experimentos de campo y área de desgaste respecto al área inicial de la herramienta (el área de desgaste corresponde a la región donde se localiza el recuadro “área desgaste: ”, encima o abajo de la curva de tendencia, según el caso), y la curva de tendencia el límite del desgaste: (a) Herramienta P3, vértices izquierdo y derecho; (b) herramienta P7, vértices izquierdo y derecho; (c) Herramienta P5, vértices izquierdo y derecho.



(a)



(b)



(c)

Tabla 3-19: Espesores de las herramientas medidos en tres puntos (los dos extremos y en el centro) y prueba LSD.

Tratamiento	Herramienta	Espesor (mm)
E11	P3	6,2230
		5,9182
		5,8420
E12	P12	5,8801
		5,8928
		5,9055
E22	P9	5,8039
		5,8166
		5,7785
E21	P7	5,9182
		5,9309
		6,0325
E32	P6	5,8801
		6,1112
		5,9182
E31	P5	5,8293
		6,0833
		5,8547
	Promedio	5,92328
	Des. estándar	0,117458745

Prueba de rangos múltiples (LSD)

Método: 95.0 porciento LSD

	Conteo	Media	Grupos homogé
P9	3	0.228333	X
p12	3	0.232	X
p5	3	0.233167	X
p7	3	0.234667	X
p6	3	0.235033	X
p3	3	0.236	X

Nota. En esta prueba los espesores de las herramientas se ingresaron en pulgadas. Obsérvese que todos los grupos estadísticamente son homogéneos.

Si se suma las áreas perdidas en cada vértice para cada punta se tiene que las herramientas perdieron las siguientes áreas por redondeo: P3 (7,1467 mm²), P7 (11,3872 mm²) y P5 (22,2931 mm²). De manera similar a las comparaciones realizadas en la Tabla 3-16, se pueden hacer para las pérdidas de área de las herramientas; obsérvese que la variación de áreas de desgaste del tratamiento E21 (herramienta P7) respecto al E11 (P3), es de 59%, la variación de E31 (P5) respecto a E21 es de 96% y de E31 respecto a E11 de 212%. Los porcentajes son inferiores a los registrados cuando se realiza por diferencia de pérdida de peso, pero se debe tener presente que en el método geométrico no se cuantificaron áreas (o volúmenes) perdidos por rayado en otros sectores de las herramientas. Sin embargo hay una clara correlación, identificada cualitativamente, entre el método geométrico y el gravimétrico.

Obsérvese también que hay una diferencia muy marcada en el área que pierde P3 en el vértice izquierdo y derecho; posiblemente la herramienta no trabajó bien nivelada, o se presentó desgaste acelerado en el vértice derecho de la herramienta por un posible encuentro con una grava o piedra de tamaño considerable.

Al comparar las imágenes de las superficies desgastadas de las herramientas luego de los experimentos de campo, es evidente que presentaron diferencias de desgaste de acuerdo al tipo de suelo. En la Figura 3-14 las herramientas de las imágenes (a)-(b), (c)-(d) y (e)-(f) trabajaron a velocidades de 2, 3 y 4 km/h respectivamente, demostrándose cualitativamente las diferencias de desgaste de acuerdo al tipo de suelo y velocidades de operación.

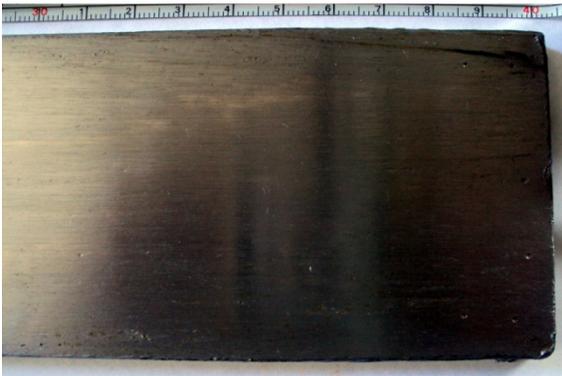
Figura 3-14: imágenes de desgaste de las herramientas: (a) P3, en E11; (b) P7, en E21; (c) P12, en E12; (d) P9, en tratamiento E22; (e) P6, en E32; (f) P5, en E31; (g) P5, antes del tratamiento. La mínima subdivisión de la escala de medida ubicada en la parte superior de las figuras corresponde a 1 mm.



(a)



(b)



(c)



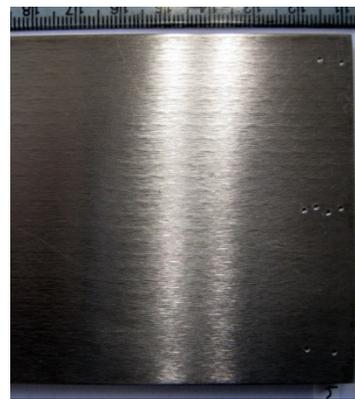
(d)



(e)



(f)



(g)

3.2.3 Análisis de influencia de las variables en cada tratamiento y comparaciones entre tratamientos

Para todas las situaciones siguientes, no se tendrá presente en el análisis los casos en los cuales las variaciones en porcentaje de la Tabla 3-16 sean negativas, excepto para las variables W y MO, que se consideran con efecto lubricante (por ejemplo, la variación E11 respecto a E12 de Ha/Hm es negativa (-3%), por lo que su presencia, en la relación E11/E12, no explica la mayor abrasividad de E11).

Generalizando para todos los casos, se tuvo la variable potencia (P), que es función de las propiedades del suelo, velocidad de operación y factores que durante los experimentos de campo se mantuvieron constantes (tipo de herramienta y profundidad de trabajo).

En los análisis presentados a continuación sólo se consideran los tratamientos correspondientes a las regiones sombreadas de la Tabla 3-16, que son los que presentan diferencias estadísticas significativas.

▪ E11 vs. E12. Suelos diferentes, velocidad igual ($v = 2 \text{ km/h}$)

Los FR/T presentaron un incremento de alrededor de 200% de E11 con respecto a E12, lo que tiene como consecuencia que Yh registró un aumento de 2,15 a 1 y que la potencia se incrementó cerca en un 47%. Lo que significa que el único factor que explica la mayor abrasividad del tratamiento E11 respecto al tratamiento E12 es FR/T, por la situación que la velocidad de operación en los dos tratamientos fue igual, y que el incremento de P de un tratamiento respecto a otro se debe fundamentalmente a la diferencia de FR/T. Por tanto la relación de variables dependientes Yh fueron sensibles al tipo de suelos, donde el suelo franco arcilloso, con un mayor contenido de FR/T fue más abrasivo.

▪ E21 vs. E22. Suelos diferentes, velocidad igual ($v = 3$ km/h)

Se destaca que FR/T se incrementó en 278%, aunque también hay participación de las siguientes variables:

- Disminución de W en 10%.
- Aumento de M (5%).
- Incremento de MO (163%).

Obsérvese que Yh en E21/E22 supera en más del doble al Yh en E11/E12, lo anterior se explica por la posible sinergia de W y FR/T que se presenta en la relación de tratamientos E21/E22 (con disminución de W e incremento de FR/T). Y por otro lado se explica por efectos dinámicos, donde E21/E22 fue más rápido en 1 km/h en comparación con E11/E12. Por tanto la relación de las variables dependientes Yh fueron sensibles a la velocidad de operación.

Por otro lado, analizando el comportamiento de la relación de P que permaneció contante estadísticamente, y no presentó ningún efectos considerable ante la disminución de la relación W y el incremento de la relación FR/T, este comportamiento lo explica en parte la alta presencia de MO en la relación de estos tratamientos y que la Da permaneció contante. Pero no es muy claro el por qué el mismo efecto no se presentó con respecto a las relaciones de Yh, aunque es posible que si la relación MO hubiera sido menor, las tasas de desgaste hubieran sido mucho mayores. Lo anterior también se puede explicar desde el punto de vista de las correlaciones parciales, donde la correlación de la relación entre Yh con las relaciones entre FR/T es del 60,96% (Tabla 3-18) y la correlación parcial de las relaciones de P con las relaciones de FR/T es de solo el 27,29% (el incremento de FR/T tiene mayores efectos en las tasas de desgaste que en los incrementos de potencia).

▪ E31 vs. E32. Suelos diferentes, velocidad igual ($v = 4$ km/h)

Obsérvese que la W disminuyó en 17%. Los incrementos de E31/E32 fueron: M (7%) (similar a la relación de tratamientos E21/E22), MO (105%), FR/T (278%) (igual a la relación de tratamientos E21/E22), donde la relación Yh tuvo como resultado el mayor de los incrementos al comparar tratamientos con velocidades iguales, de 443%.

De nuevo la relación P no presenta variaciones estadísticamente considerables, aunque en comparación con la relación E21/E22, W disminuye en mayor porcentaje y el incremento de la relación MO fue menor. Sin embargo el presente comportamiento confirma las afirmaciones realizadas en E21 vs. E22 (con registros aun más extremos).

La diferencia más relevante entre E31/E32 con respecto al tratamiento E22/E21 es la mayor velocidad de trabajo (en 1 km/h) y mayor disminución en el contenido de humedad, dando como resultado una mayor relación de tasas de desgaste. Obsérvese que Yh en E31/E32 supera en 1,6 veces al Yh en E21/E22, corroborando las afirmaciones realizadas en E21 vs. E22.

▪ **E21 vs. E11. Velocidad diferente y suelos iguales (franco arcilloso)**

Las variables con mayor incremento son P (55%) y FR/T (32%). Donde el incremento de Yh (95%) se asocia básicamente al tratamiento E21 con mayor velocidad de trabajo. Respecto a lo anterior se confirma los efectos dinámicos que se presentan en el desgaste con el incremento de la velocidad (para este caso en solo un 1 km/h). El incremento de la relación Yh no fue mayor, por el hecho que la mayoría de las variables entre E21 y E11 fue estadísticamente igual (Da, Ha/Hm, W, M y hasta podría incluirse MO que tuvo un leve aumento del 8%).

▪ **E31 vs. E11. Velocidad diferente y suelos iguales (franco arcilloso)**

Se tiene una diferencia de velocidades entre dos tratamientos de 2 km/h, registrándose los mayores porcentajes de relaciones Yh (438%) respecto a los valores registrados en la tabla. Donde hay participación de casi todas las variables del suelo de alguna manera, excepto de Ha/Hm y MO. Las variaciones fueron: W (-34%), M (4%), FR/T (50%) y P (284%). Donde W y P presentaron los mayores niveles de variación con respecto a las demás relaciones entre tratamientos, y por lo tanto fueron las variables que se les atribuye mayor efecto en el alto incremento en porcentaje de Yh. De nuevo se verifica lo afirmado en E21 vs. E22 respecto a la velocidad de operación.

▪ **E31 vs. E21. Velocidad diferente y suelos iguales (franco arcilloso)**

Si se realiza la comparación con el tratamiento E31/E11, se observa que Da y W tienen comportamiento similar. La variación de P de E31 respecto a E21 fue de 147%, menos considerable que para la situación E31/E11, lo que demuestra el efecto que tuvo la velocidad. Respecto a la Tabla 3-16 E31/E11 supera a E31/E21 en 2,5 en la relación de Yh, 1,9 en la relación de P, 2,0 en la variable controlable velocidad, mientras las otras variables tienen un comportamiento muy similar, demostrándose de nuevo el efecto de la velocidad en los resultados de los tratamientos.

▪ **E22 vs. E12. Velocidad diferente y suelos iguales (franco limoso)**

FR/T y Yh no varían estadísticamente entre ambos tratamientos, de nuevo se confirma desde otro punto de vista, la correlación de FR/T y Yh, y el peso que tiene FR/T en los modelos de desgaste de herramientas agrícolas. Obsérvese que P en E22 es 2,27 mayor que E12 (127%), de acuerdo al resultado de las variables del suelo, Ha/Hm, W y M son desfavorables para el tratamiento más abrasivo (E22), por lo que la única variable que puede aumentar la potencia es la mayor velocidad de trabajo (la diferencia de velocidades entre E22 y E21 es de 1 km/h). Por otro lado, como el contenido de humedad en E22 fue mayor que en E12, permitió equilibrar el Yh en ambos tratamientos y que la potencia no presentará valores mayores.

- **E32 vs. E12. Velocidad diferente y suelos iguales (franco limoso)**

En cuanto a Y_h , su mayor valor en 113% de E32 respecto a E12 se asocia a la disminución de W (22%), al aumento de D_a (4%) y P (425%). De acuerdo a lo anterior puede afirmarse que los incrementos de P no tienen como resultado iguales incrementos de Y_h , lo anterior se afirma con base en el resultado de ambos, donde los incrementos de P son casi 4 veces superiores a los registrados en Y_h . Justificándose en parte el valor intermedio de la correlación parcial entre Y_h vs. P (Tabla 3-18).

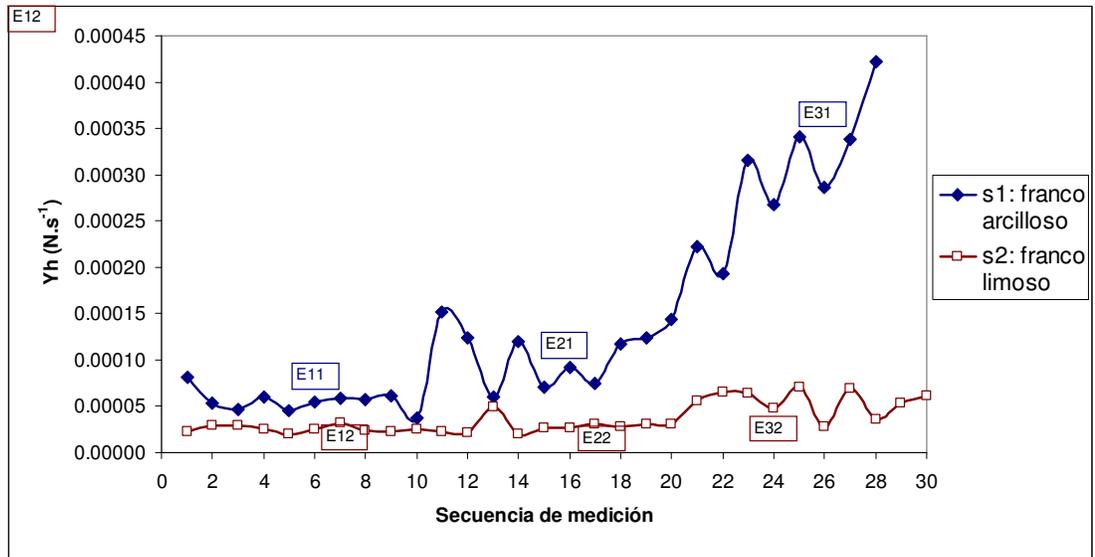
- **E32 vs. E22. Velocidad diferente y suelos iguales (franco limoso)**

El aumento de la relación Y_h en 93% se asocia a la disminución de la relación W (-30%), al incremento de las relaciones H_a/H_m (4%) y P (131%). Obsérvese que el hecho que no haya participación de los FR/T , aunque los niveles de las otras tres relaciones son relativamente altos y que la velocidad de E32 respecto a E22 sea mayor en 1 km/h, la relación Y_h no aumenta de manera considerable (teniendo presente algunas de las escalas de variación obtenidas, por ejemplo en E31/E11 fue de 438% respecto a la relación Y_h).

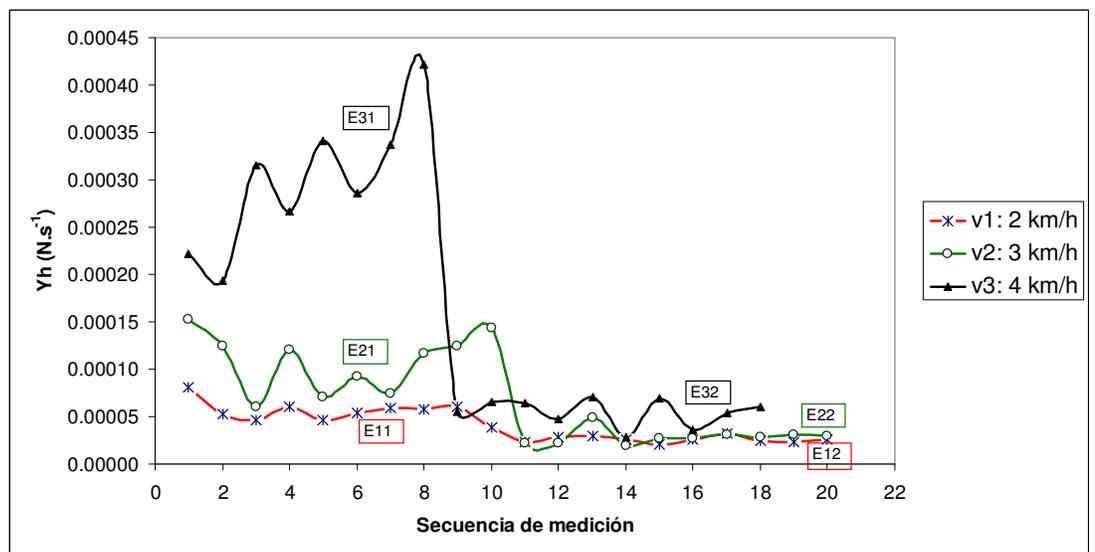
De acuerdo a la Figura 3-15 (a) en el suelo 1 el incremento entre E11 y E21 lo explica el aumento de la velocidad en 1 km/h y una relación FR/T 32% mayor en E21; sin embargo el aumento de Y_h en E31 es considerable, por participación de otras variables, donde se destaca la disminución de W (-35%), además de la mayor velocidad de operación. En cuanto al suelo 2, Entre E12 y E22, no hay efecto de la velocidad en Y_h (debe considerarse que la humedad en E22 fue mayor que en E12, lo que disipó un posible efecto de la velocidad), entre E22 y E32 si hay un incremento en el desgaste, asociado al aumento en la velocidad en 1 km/h y la disminución de W (-30%). Haciendo un paralelo entre los suelos 1 y 2, se observa una considerable sinergia entre la velocidad, FR/T y W en el suelo 1, este comportamiento no se manifestó en el suelo 2, teniéndose presente que en el suelo 2 también hubo presencia de un tratamiento con similar disminución en la humedad, donde las variaciones de velocidad fueron iguales a las presentadas en el suelo 1, pero su diferencia sobresaliente fue su menor relación de FR/T .

Respecto a la Figura 3-15 (b) Los registros Y_h son sensibles al cambio del tipo de suelo para cada una de las tres velocidades (2, 3 y 4 km/h). Aunque entre los tratamientos E11 a E12 se presenta el menor cambio de Y_h asociado principalmente a que tienen humedades del suelo estadísticamente iguales, lo que no ocurre entre E21/E22 y E31/E32. Entre los tratamientos E31/E32 se corrobora de nuevo la sinergia *humedad del suelo – velocidad de trabajo – FR/T* con sobresalientes características de desgaste durante la interacción suelo – herramienta.

Figura 3-15: Comportamiento de Y_h : (a) con el cambio de velocidad para cada suelo (franco arcilloso y franco limoso), (b) con el cambio de suelo para tres velocidades (2, 3 y 4 km/h).



(a)



(b)

Complementado el análisis de la Figura 3-15 (a) y de acuerdo a la Tabla 3-16, la humedad del suelo (W) es estadísticamente igual entre los tratamientos E11 y E12, con

una consecuencia de aproximar los dos suelos respecto a Y_h , demostrándose el efecto lubricante que posee el agua.

3.3 Cálculo de la abrasividad del suelo

3.3.1 Modelos adimensionales de abrasividad de suelos agrícolas

En el numeral 2.6.4 se dedujo la ecuación dimensional (2.12) que se planteó para explicar la abrasividad de un suelo agrícola y en el Anexo C se presenta la solución de Gauss para este tipo de ecuaciones. De acuerdo a lo anterior se hallaron los grupos adimensionales π_1 , π_2 , π_3 , π_4 , π_5 , π_6 y π_7 , correspondientes a las ecuaciones de la 3.1 a la 3.9

$$(a) \quad \pi_1 = P \cdot Da^{1/3} / Y_h \cdot FR^{1/3} \quad (3.1)$$

π_1 se transformo en π_8 (ver h).

$$(b) \quad \pi_2 = W \cdot Da / FR \quad (3.2)$$

Se simplificó con ayuda del PI término (c), ver (g).

$$(c) \quad \pi_3 = MO \cdot Da / FR \quad (3.3)$$

Se simplificó con ayuda del PI término (b), ver (g).

$$(d) \quad \pi_4 = FR / T \quad (3.4)$$

En la presente investigación este Pi termino se expresará mejor como

$$\pi_4 = FR/T \quad [\pi_4^{-1} = (T / FR)^{-1}],$$

que expresa la relación de cantidad entre FR y T. Se resalta esta relación de los componentes granulométricos del suelo, donde su proporción puede tener grandes efectos tribológicos.

$$(e) \quad \pi_5 = M \quad (3.5)$$

Adimensional entre 0 y 1.

$$(f) \quad \pi_6 = Ha / Hm \quad (3.6)$$

Pi término obtenido analíticamente (Hutchings, 1992; Zum Gahr, 1998; Moore, 1975).

$$(g) \quad \pi_7 = W / MO \quad (3.7)$$

Se determinó al resolver el producto de π_2 por el inverso de π_3 (el Pi término (g) es una simplificación de los PI términos (b) y (c)), donde la variación de W y MO es directamente proporcional. De nuevo se obtiene otra interesante ecuación, donde se expresa que suelos con alto contenido de MO tienden a ser más

húmedos.

$$(h) \quad \pi 8 = P / Yh \cdot W^{1/3} \quad (3.9)$$

El término $\pi 8$ se obtuvo al relacionar (a) con (b): $\pi 8 = \pi 1 / (\pi 2)^{1/3}$. Es una ecuación inédita de tipo tribológico que expresa la relación directa de Yh con P , e inversa de Yh con $W^{1/3}$, y coincide con los resultados de campo de la Tabla 3-11, donde se muestra que la potencia es directamente proporcional a la pérdida de peso de la herramienta, y que W , por su efecto lubricante, tiene el efecto de disminuir la cantidad de pérdida de peso (Yh).

Para el desarrollo del modelo empleando análisis dimensional cada línea se consideró como un experimento independiente, y todos los 58 resultados se ingresaron en el programa de regresión lineal obteniéndose dos modelos que se compararon directamente con los resultados reales (Figura 3-16). Los dos modelos corresponden a los dos métodos diferentes para determinar la morfología de las partículas de suelo: puntas (SPQ) y perímetros (MP) (ecuaciones 3.10 y 3.11).

- Modelo obtenido calculando morfología por el método de puntas (SPQ)

$$Yh = 9,8^8 \cdot W^{0,001} \cdot MO^{-0,20} \cdot T^{-0,86} \cdot FR^{0,72} \cdot Da^{0,12} \cdot M^{8,10} \cdot P^{1,00} \cdot (Ha/Hm)^{2,57} \quad (3.10)$$

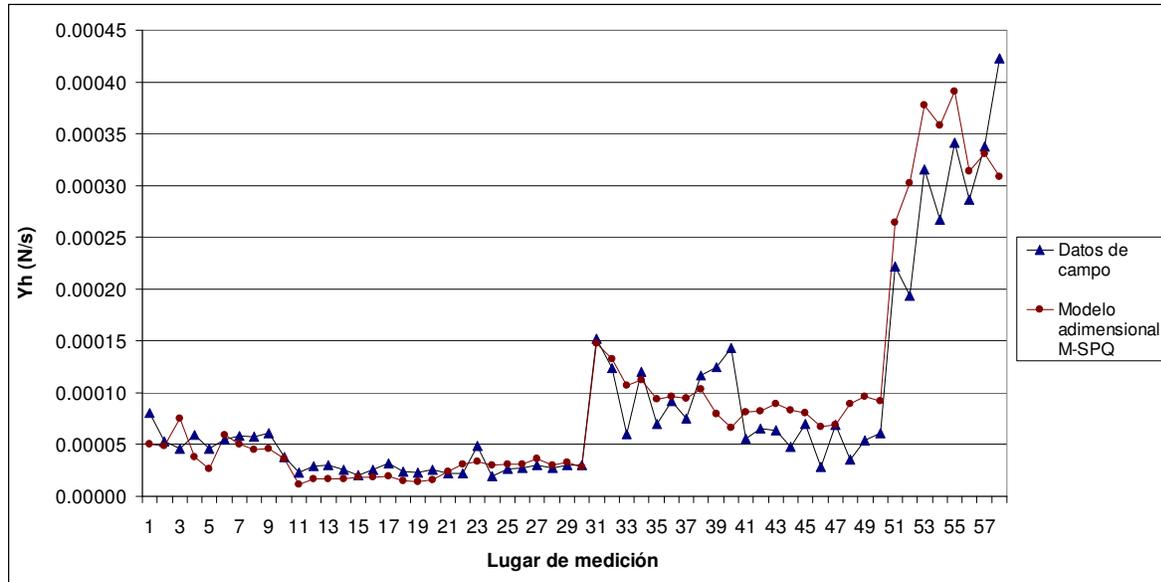
- Modelo obtenido calculando morfología por el método de perímetros (MP)

$$Yh = 9,0^9 \cdot W^{0,02} \cdot MO^{0,31} \cdot T^{1,29} \cdot FR^{0,67} \cdot Da^{0,62} \cdot P^{1,00} \cdot M^{0,003} \cdot (Ha/Hm)^{2,00} \quad (3.11)$$

Se decidió no utilizar en los análisis definitivos el modelo correspondiente a la ecuación (3.11). Lo anterior se justifica básicamente por el hecho que la morfología calculada por el método de perímetros presentó correlaciones parciales muy bajas (0,0566, ver Tabla 3-13). Lo anterior posiblemente causado por el hecho que era más sensible el método SPQ para medir la morfología de partículas, pues este método, aunque más complicado de desarrollar, se concentraba sólo en los pocos puntos salientes, mientras que con el método MP se debe evaluar toda la periferia de la partícula. Sin embargo, a medida que se presenten avances tecnológicos es aspectos de resolución de la imágenes registradas por medios digitales, es posible que el método MP mejore en el cálculo de la morfología, e incremente sus niveles de correlación con el desgaste; adicionalmente tiene la ventaja que es un método de fácil de aplicación.

De acuerdo a la prueba de Kolmogorov – Smirnov, entre el modelo de análisis dimensional (M-SPQ) y los resultados de Yh obtenidos en experimentos de campo, no se presentan diferencias estadísticas significativas (Figura 3-16).

Figura 3-16: Comparación del desgaste Y_h ($N.s^{-1}$): datos de campo vs. obtenidos con el modelo de análisis dimensional (la variable Morfología de partículas se determinó con el método SPQ).



Lugar de medición	v (km/h)	suelo
1 a 10	2	1
10 a 20	2	2
20 a 30	3	2
30 a 40	3	1
40 a 50	4	2
50 a 57	4	1

Kolmogorov-Smirnov Test

Estadístico DN estimado = 0.172414

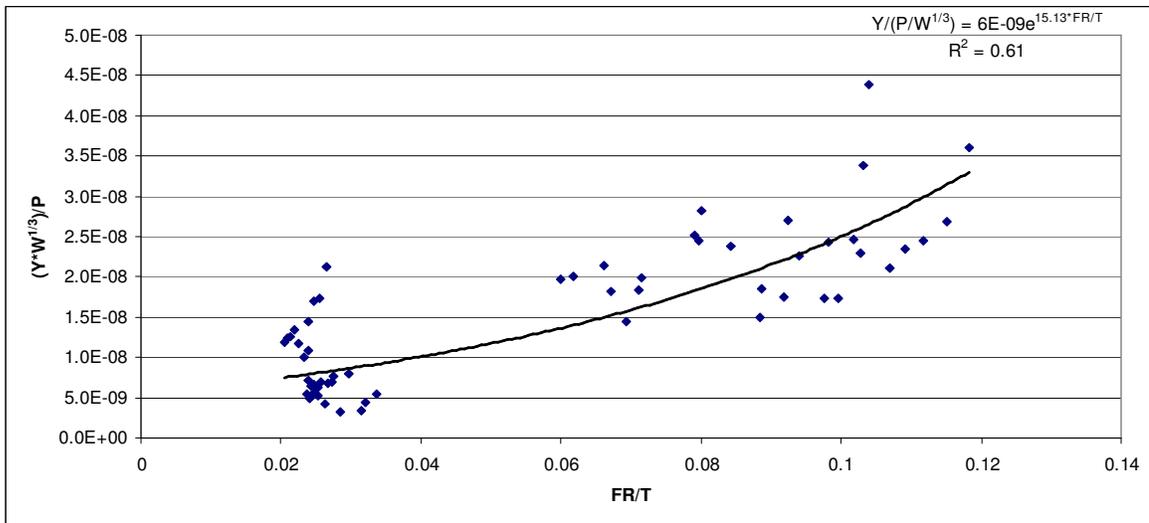
Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 0.928477

Valor P aproximado = 0.357665 (si **P** > **0.05**, no hay diferencias estadísticas significativas entre las dos distribuciones (con nivel de confianza del 95.0%).

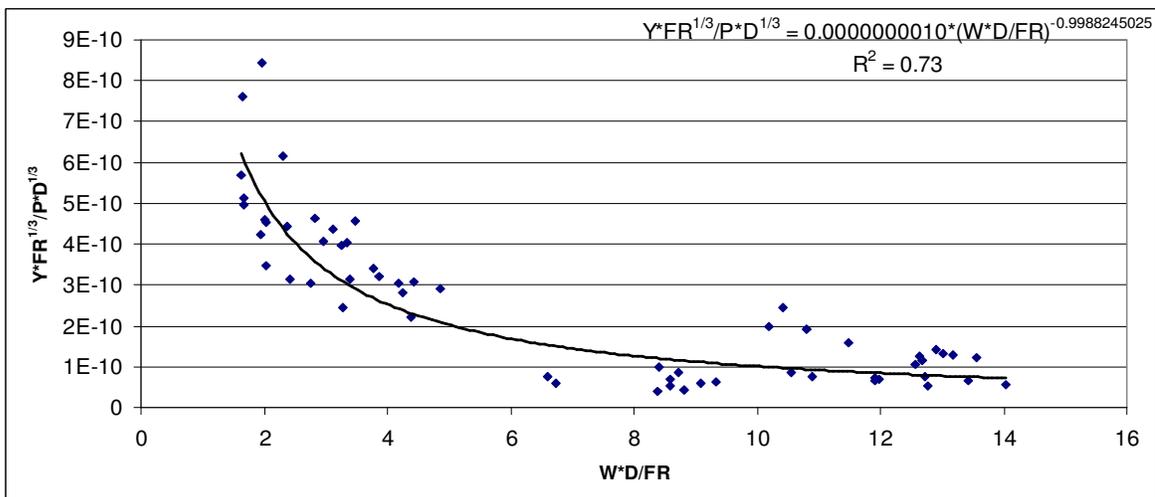
Relaciones entre ecuaciones adimensionales

Con el análisis dimensional se han encontrado ecuaciones inéditas que han sido un gran aporte a la ingeniería y en general a la ciencia, ejemplos muy conocidos son los números de Reynolds, Euler, Froude, Cauchy, Weber, entre otros. En la Figura 3-17 se observa que entre los grupos adimensionales hallados para el modelo de abrasividad de suelos agrícolas, se presentan correlaciones sobre las cuales sería posible realizar futuras investigaciones y demostrar su eficacia.

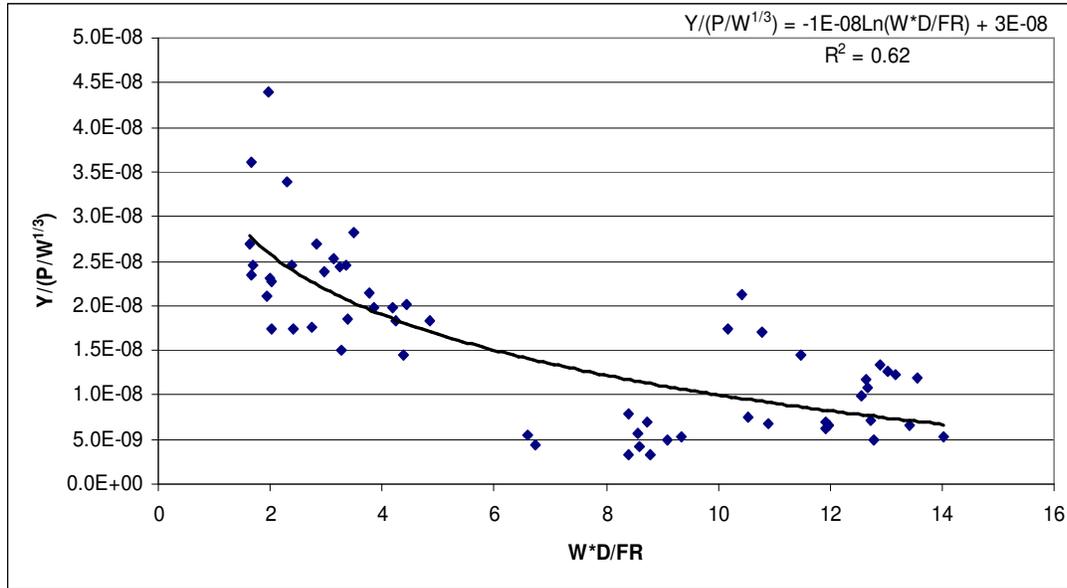
Figura 3-17: Relaciones entre grupos adimensionales.



(a) adimensionales π8 vs. π4



(b) adimensionales π10 vs. π11

(c) adimensionales π_8 vs. π_2 .

Cabe anotar que hay variables del suelo que no se incluyeron en los análisis anteriores, por ejemplo la cohesión, ángulo de fricción interna, la adhesión, entre otras. Para el caso particular de la cohesión del suelo, ésta puede variar en función de la textura, del contenido de fragmentos de roca, de la humedad del suelo, del contenido de materia orgánica, entre otros factores; en la presente investigación no se incluyó la cohesión al ser considerada como una variable secundaria, no incluida en el presente desarrollo de análisis dimensional. Similar consideración es posible realizarla para la adhesión, ángulo de fricción interna y otras variables no mencionadas.

3.3.2 Modelos de desgaste utilizando regresiones multivariadas

Se realizaron regresiones lineales multivariadas entre la variable dependiente Y_h y las variables independientes W , Da , FR/T , MO , M , Ha/H_m y P , a medida que se corría el modelo con el programa Statgraphics 5.1 plus, las variables de menor peso salieron de la ecuación, hasta que se llegó a una solución satisfactoria estadísticamente (ecuación (3.12)). En la Tabla 3-20 se resumen los estadísticos obtenidos del análisis de regresión, donde los residuales dieron normales (estadístico de Shapiro-Wilk) y con varianza homogénea (estadísticos de Levene), confirmado que el modelo explica de manera adecuada la abrasividad de los suelos estudiados. La morfología de las partículas de suelo fue medida en todos los casos por el método de puntas (SPQ).

$$Y_h \text{ total M-SPQ} = -0,000633375 + 0,0042295*FR/T - 0,000145793*W + 0,00170383*M - 0,000872458*MO \quad (3.12)$$

Tabla 3-20: Estadísticos del modelo obtenido con regresión multivariada para el lote experimental de Cotové.

Estadísticos				
		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-0,000633375	0,000204607	-3,09557	0,0031
FR/T	0,00422948	0,000389797	10,8505	0,0000
W	-0,000145793	0,0000206137	-7,07264	0,0000
M	0,00170383	0,000371527	4,58602	0,0000
MO	-0,000872458	0,00010622	-8,21371	0,0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4,52671E-7	4	1,13168E-7	118,95	0,0000
Residuo	5,04228E-8	53	9,51374E-10		
Total (Corr.)	5,03094E-7	57			

R-cuadrada = 89,9775 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 89,221 por ciento

Como el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Pruebas de Normalidad para residuales

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955735	0,0699487

Como valor $P > 0,05$, los residuales de la regresión múltiple son normales

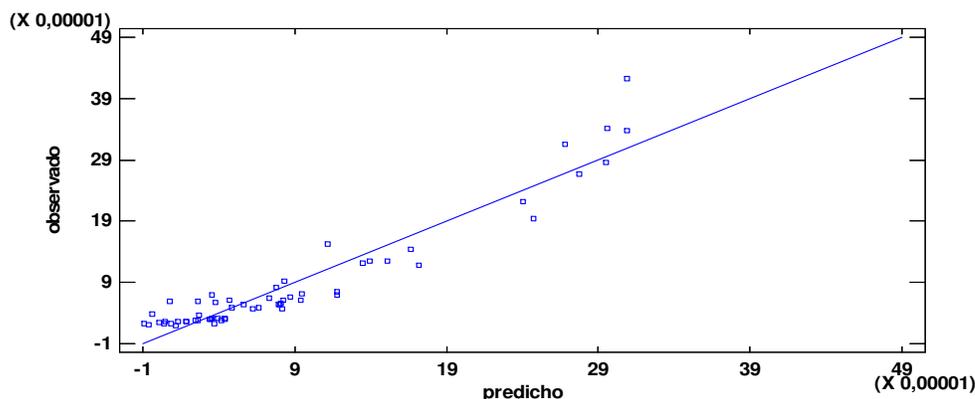
Verificación de varianza de residuales

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	2,8892	0,0947237

Como valor $P > 0,05$, los residuales cumplen homogeneidad de varianza.

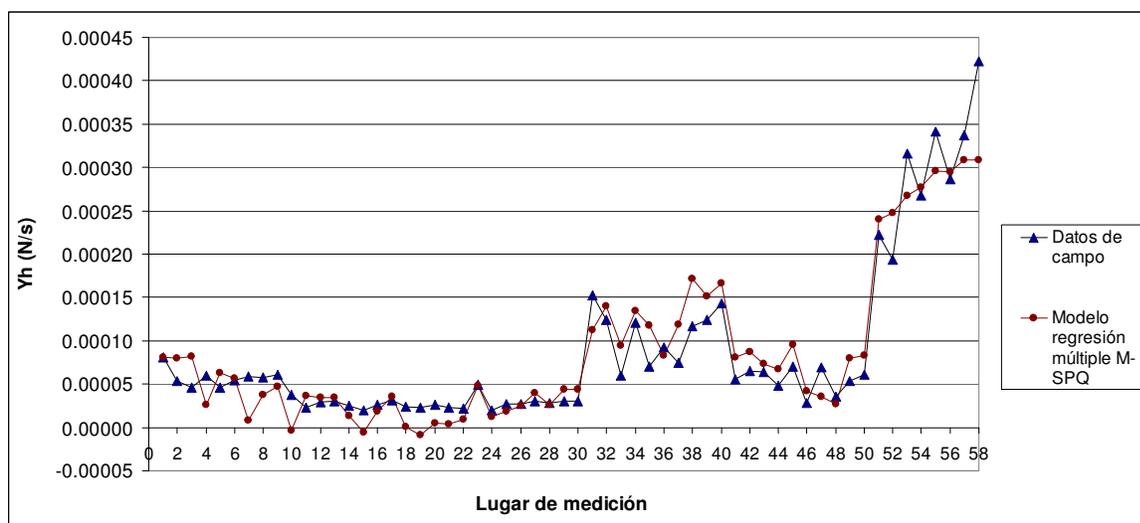
En la Figura 3-18 se presenta la regresión multivariada entre la variable dependiente pérdida de peso de la herramienta (Yh M-SPQ) con las variables independientes del suelo FR/T, M, MO y W.

Figura 3-18: Regresión multivariada para Y_h total M-SPQ con variables del suelo (FR/T, M, MO y W) vs. pérdida de peso de la herramienta (Y_h).



En la Tabla 3-13 se registraron las correlaciones parciales entre todas las variables para cada nivel de análisis considerado, (la morfología medida por el método SPQ) obsérvese que todas las variables con nivel de correlación parcial alto y valor $P < 0,05$ quedaron incluidas en el modelo de regresión múltiple. En la Figura 3-19 se observa el modelo obtenido con la regresión múltiple comparado con los datos reales de desgaste en campo; de acuerdo a la prueba de Kolmogorov – Smirnov, entre el modelo de regresión múltiple y los resultados de Y_h obtenidos en experimentos de campo, no se presentan diferencias estadísticas significativas.

Figura 3-19: Comparación del desgaste Y_h ($N \cdot s^{-1}$): datos de campo vs. obtenidos con el modelo de regresión múltiple (la variable morfología de partículas se determinó con el método SPQ).



Lugar de medición	v (km/h)	suelo
1 a 10	2	1
10 a 20	2	2
20 a 30	3	2
30 a 40	3	1
40 a 50	4	2
50 a 57	4	1

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico DN estimado = 0,206897

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 1,11417

Valor P aproximado = 0.167074 (si $P > 0,05$, no hay diferencias estadísticas significativas entre las dos distribuciones (con nivel de confianza del 95,0%).

3.3.3 Índice de abrasividad (Ia).

En la ecuación (3.13) se presenta la expresión propuesta para asignar el índice de abrasividad a determinado suelo agrícola, teniéndose presente que el nivel de abrasividad será directamente proporcional al valor de Ia , el cual oscila entre 0,1 (para un suelo completamente “inofensivo”) y 0,9 (suelo de máxima abrasividad). Donde se omiten los extremos 0 y 1, por la razón fundamental que ninguno de los parámetros a_i se calificó con valor “0”, pues anularía la ecuación (3.13), donde es posible que un a_i tienda a un valor muy bajo (casi “0”) pero otros a_i tiendan a la unidad.

$$Ia = k_1.a_1 . k_2.a_2 . k_3.a_3 . k_4.a_4 . k_5.a_5 . k_6.a_6 . k_7.a_7 \quad (3.13)$$

$$0,1 < Ia < 0,9$$

Donde,

Ia : Índice de abrasividad

a_i : Factor de abrasividad, en función de los valores de cada variable establecida como de influencia significativa.

k_i : Coeficiente que le otorga un peso mayor o menor a cada factor de abrasividad, de acuerdo a su valor dentro del modelo de regresión múltiple.

En la propuesta de los parámetros de abrasividad se tuvo presente unos límites en los cuales el modelo de abrasividad se puede aplicar de manera apropiada (ver Tabla 3-21).

Tabla 3-21: Límites de las variables o factores en los cuales tiene aplicación el índice de abrasividad de suelos agrícolas

Propiedad o factor	Símbolo	Rango medio del modelo*	Rango máximo permisible* **
Suelos	S	---	Vérticos
Humedad gravimétrica del suelo (m ³)	W	1,28±0,22 (25,40±4,37%)	0,85 – 1,72 (16,9- 34,1%)
Densidad aparente (N m ⁻³)	Da	13297,78±467,48 (1,36±0,05 Mg/m ³)	11964,5 - 14220,1 (1,22 – 1,45 Mg/m ³)
Granulometría (Fragmentos de roca / Tierra fina)	FR/T	0,06±0,03	0,020 – 0,118
Morfología de las partículas (---)	M- SPQ	0,57±0,02	0,550 - 0,601
Relación dureza de las partículas de suelo / dureza de la herramienta (---)	Ha /Hm	6,21±0,12	5,883 - 6,447
Contenido de materia orgánica (m ³)	MO	0,34±0,13 (6,75±2,58%)	0,153 – 0,57 (3,0 – 11,3%)
Condiciones dinámicas de operación: Potencia (N m s ⁻¹) y velocidad de operación (km/h)	P V	P: 6033,47 ±3785,93 (P: 8,1±5,1 Hp)	P: 1191 – 13787 v: 2 – 4 (P: 1,6 – 18,5 Hp)

* En función de la desviación estándar

**Con base en las mediciones extremas medidas durante los experimentos.

Durante los experimentos desarrollados en diferentes semanas en los suelos de Cotové, se presentaron condiciones límites en cuanto a la humedad gravimétrica y la densidad aparente, variables que mostraron correlaciones entre media y altas con P y Yh (ver Tabla 3-13). En la Tabla 3-11 se puede verificar que para la variable W se tuvo el suelo con contenidos extremos de humedad (respecto al adecuado uso de arados de cincel, donde se recomienda que este tipo de equipo opere preferiblemente con W entre 18 y 26 %; donde el límite de soltura reportado en el Anexo F del suelo fue de 21,33±2,49%). Por el hecho que el valor de humedad era desconocido al momento de realizar los experimentos (la humedad se determinó por el método de secado al horno), algunos tratamientos estuvieron por fuera de los límites recomendables para cinceles, pero justamente esta circunstancia ofrece la ventaja de poder analizar el comportamiento de la abrasividad en puntos extremos. De manera similar, se hicieron experimentos de Da con valores altos, medios y bajos, prácticamente en el intervalo de variación posible cuando se trabaja con arados de cincel en estos tipos de suelos. Lo anterior implicó que P se haya evaluado en el intervalo técnicamente recomendable cuando se trabaja con cinceles. La FR/T se evaluó para dos condiciones muy diferentes, de acuerdo a los experimentos de campo, con FR/T próxima a 0,12 se tuvo una condición extrema en la cual se presentó falla de una de las herramientas por rotura, por lo que superar el valor de FR/T de 0,12 no es técnicamente recomendable al operar con cinceles. En el lote de Cotové MO también presentó un buen rango de variación (0,15 – 0,58 m³), aunque sería factible encontrar suelos vérticos por encima y por debajo del anterior rango, donde los

modelos propuestos pueden perder precisión. Finalmente, con las variables M y Ha/Hm no se tuvo una amplia variación, casi fueron constantes en todo el lote, es muy posible que suelos vérticos de otras regiones presenten valores que se salgan por encima o por debajo del anterior rango, aunque es más factible que se tengan valores inferiores, por el hecho que el nivel de dureza de los suelos de Cotové es alto, constituido por alta presencia de partículas de sílice o sus transformaciones metamórficas, siendo muy poco factible encontrar alto número de partículas en un suelo agrícola con niveles de dureza que superen el sílice. Algo similar ocurre con la M, variable poco registrada en suelos agrícolas, pero que en su medida SPQ se encuentra en los límites superiores a las partículas minerales reportadas por investigadores como Stachowiak (1998; 2000) (ver numeral 1.7), siendo mucho más factible encontrar en otros suelos vérticos partículas mas redondeadas, consecuencia de procesos aluviales de largo plazo.

Para los suelos vérticos como el de Cotové técnicamente no se recomienda realizar labranza en lotes que tengan más del 13% de FR y W inferior al 16%, aunque si la humedad se encuentra en niveles superiores (24 – 26%) sería posible laborar con un mayor contenido de FR gracias al efecto lubricante del agua. Con valores de humedad menores (16%) las condiciones de abrasividad tienden a ser extremadamente críticas y con valores de humedad mayores (26%) se presentará deficiente roturación del suelo, el patinaje de las llantas del tractor tenderá a incrementarse a valores no recomendables y se tendrá mayor impacto negativo en el suelo (daño de la estructura y sellamiento de los poros por el patinaje de las llantas).

Respaldando lo anterior, se considera importante los resultados de Owsiak (1999) y Natsis *et al.* (2008) que demostraron que en suelos arcillosos la humedad redujo el desgaste de los implementos al reducir la dureza del suelo. Por lo tanto se recomienda hacer el laboreo preferiblemente con un contenido de humedad muy cercano, por lo menos, al límite de soltura, muy similar a la capacidad de campo, para minimizar el desgaste de los implementos agrícolas.

Ia a partir del modelo de la ecuación de regresión múltiple.

Los coeficientes que acompañan a cada variable en las ecuaciones de regresión múltiple equivalen a la pendiente de la gráfica obtenida a partir de cada ecuación de regresión. Dicho de otra manera, los coeficientes que acompañan a cada variable tienen un peso dentro de la ecuación de regresión. Tal peso se expresó en decimal, teniéndose presente la suma total de los pesos de determinada ecuación.

Por otro lado, las diferencias entre los valores límites de cada variable (Tabla 3-21) se determinaron linealizando las curvas de regresión utilizando los valores extremos de cada variable y el rango de calificación de abrasividad en la escala de 0,1 a 0,9, a cada linealización realizada se le halló su pendiente.

Ia para el modelo de regresión múltiple del lote de estudio (ver ecuaciones 3.12 y 3.13):

- Suma del valor absoluto de los coeficientes: 0,006951561
- Peso de los coeficientes k_i (ecuación (3.13))

$$k_1 = 0,000145793/0,006951562 = 0,0209727$$

$$k_2 = 0,000872458/0,006951562 = 0,12550534$$

$$k_3 = 0,00422948/0,006951562 = 0,60842162$$

$$k_4 = 0,00170383/0,006951562 = 0,245100345$$

- Niveles de abrasividad (a_i) de cada variable. Se determinó la diferencia entre valores extremos de cada variable, y se linealizó en la escala de 0,1 a 0,9 (ver Tabla 3-22).

Tabla 3-22: Calificación de cada variable en función de su linealización con los factores de abrasividad (a_i).

W (m ³)	a_1	MO (m ³)	a_4	FR/T	a_5	M	a_6
0,85	0,9	0,17	0,9	0,02	0,1	0,550	0,1
0,96	0,8	0,22	0,8	0,03	0,2	0,556	0,2
1,08	0,7	0,26	0,7	0,04	0,3	0,563	0,3
1,19	0,6	0,31	0,6	0,05	0,4	0,569	0,4
1,30	0,5	0,35	0,5	0,07	0,5	0,575	0,5
1,41	0,4	0,40	0,4	0,08	0,6	0,581	0,6
1,53	0,3	0,44	0,3	0,09	0,7	0,588	0,7
1,64	0,2	0,49	0,2	0,10	0,8	0,594	0,8
1,75	0,1	0,53	0,1	0,11	0,9	0,600	0,9
Pendiente: - 0,8889		Pendiente: - 2,2222		Pendiente: 8,8889		Pendiente: 16	

- Finalmente, reemplazando cada k_i en la ecuación (3.13) se obtiene el modelo de índice de abrasividad general para suelos vérticos con características similares a los estudiados (ecuación (3.14)).

$$Ia = 0,0209727 \cdot a_1 + 0,12550534 \cdot a_4 + 0,60842162 \cdot a_5 + 0,245100345 \cdot a_6 \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) se verificó con cada una de las variables medidas durante los experimentos de campo. Se sustituyó el valor de cada variable por su respectivo valor equivalente de abrasividad a_i (de acuerdo a la Tabla 3-22). Luego cada registro Ia se correlacionó con cada uno de los valores de pérdida de peso (Y_h) experimentales (de la Tabla 3-11). El resultado de las correlaciones obtenidas se resume en la Tabla 3-23, donde efectivamente hubo un alto margen de correlación de Ia propuesto con los resultados de pérdida de peso (Y_h).

Tabla 3-23: Correlación entre el índice de abrasividad (Ia) y Y_h

	Ia
Y_h	0,9114
Tamaño de Muestra	(58)
Valor P	0,0000

Correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. Valores $P < 0,05$ indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

Calificación del índice de abrasividad (*Ia*) del suelo vértico de Cotové.

Se calificó el *Ia* del suelo de estudio en varios niveles: todo el lote, cada uno de los dos suelos del lote, y en cada tratamiento E_{ij} . Para lo anterior se usó el valor medio de cada una de las variables consideradas en el modelo de regresión múltiple y los valores de calificación propuestos en la Tabla 3-22. De acuerdo a las anteriores consideraciones se resumieron los valores obtenidos de *Ia* para cada situación considerada en la Tabla 3-24.

Tabla 3-24: Calificación de factores de abrasividad e índice de abrasividad de un suelo vértico de Cotové hallado para varios niveles de subdivisión.

Tipo de suelo	Variable	Factor de abrasividad	Variable	Factor de abrasividad	Variable	Factor de abrasividad	Variable	Factor de abrasividad	Índice de abrasividad	Normalizando con E31
	W (m³)	<i>a</i>₁	MO (m³)	<i>a</i>₄	FR/T	<i>a</i>₅	M	<i>a</i>₆	<i>Ia</i>	
Suelo total	1,28	0,52	0,34	0,52	0,056	0,42	0,567	0,38	0,000017	0,35
s1 (Franco arcilloso)	1,23	0,57	0,47	0,23	0,090	0,72	0,579	0,57	0,000021	0,43
s2 (Franco limoso)	1,33	0,48	0,22	0,79	0,025	0,15	0,556	0,20	0,000004	0,09
E11 (s1)	1,35	0,46	0,45	0,27	0,071	0,56	0,569	0,41	0,000011	0,23
E12 (s2)	1,38	0,43	0,24	0,74	0,023	0,13	0,566	0,36	0,000006	0,12
E22 (s2)	1,53	0,30	0,19	0,86	0,025	0,14	0,551	0,12	0,000002	0,04
E21 (s1)	1,37	0,43	0,49	0,19	0,094	0,76	0,581	0,59	0,000015	0,30
E32 (s2)	1,07	0,70	0,23	0,76	0,028	0,17	0,551	0,12	0,000004	0,09
E31 (s1)	0,89	0,86	0,48	0,22	0,107	0,87	0,590	0,75	0,000049	1,00

La Tabla 3-24 se normalizó con base en la subdivisión de suelo con mayor *Ia*, que correspondió al tratamiento E31 (s1), que tiene una alta diferencia de abrasividad respecto a las otras 8 subdivisiones de suelo. Los resultados de la tabla se relacionan con varios de los resultados previamente obtenidos, por ejemplo con la Figura 3-12 es evidente la diferencia del tratamiento E31 respecto a los otros tratamientos, complementado con el hecho que se trabajó a la velocidad más alta durante los experimentos de campo, con ello en parte se explica el daño de la herramienta durante el experimento número 59. La Figura 3-12 (a) corrobora el resultado de los *Ia* de los tratamientos E11, E21 y E31 (ordenado de mayor a menor respecto al resultado del índice de abrasividad).

Obsérvese que en la Tabla 3-16 los tratamiento E12 y E22 son estadísticamente iguales respecto a Y_h , y que de acuerdo a la Tabla 3-24 tiene un *Ia* de 0,12 y 0,04, respectivamente; las tasas de desgaste similares de estos dos tratamientos se explican por la razón que el tratamiento E22 se trabajó a una velocidad mayor que el tratamiento E12, presentándose un equilibrio de desgaste por factores dinámicos. Lo mismo puede afirmarse de E32 con menor *Ia* que E12, pero con mayor velocidad de operación. Finalmente se resalta que el suelo 1 supera en todas sus subdivisiones al suelo 2 en cuanto al *Ia*, resultado que concuerda con los experimentos de campo.

3.4 Discusión general

Los estudios de variabilidad espacial fueron fundamentales durante la fase experimental de la investigación, dado que gracias a ellos se logró identificar y cuantificar cada una de las variables en cada sitio del lote y su incidencia en el desgaste de las herramientas de cincel. Con el análisis de componentes principales se logró demostrar y delimitar con exactitud los dos tipos de suelos presentes en el lote: franco arcilloso en la parte inferior, franco limoso en la región central y de nuevo franco arcilloso en la región superior; para los experimentos de campo se descartó el franco arcilloso de la parte superior, por su muy alta concentración de FR en uno de los sitios (región gris o más clara de la Figura 3-5 c).

Se propuso tres metodologías para explicar la abrasividad de los suelos agrícolas:

Una primera metodología se basó en observaciones cualitativas de imágenes de herramientas desgastadas y en la *comparación entre tratamientos* (numeral 3.2.1), cuantificando en porcentaje las variaciones de las variables de un tratamiento con respecto a otro con variables controlables similares (comparación entre tratamientos con igual velocidad o comparación entre tratamientos con igual tipo de suelo). Luego de un análisis de porcentajes de variación y de descartar algunas variables estadísticamente iguales al comparar dos tratamientos, se llegó al siguiente orden de importancia en peso de las variables consideradas (empleando el método de correlaciones parciales): FR/T, MO, M, P, W, Ha/Hm, Da. Si bien esta metodología no arroja una ecuación que cuantifique el desgaste, se consideró muy confiable en el peso que le otorga a las variables en cuanto a la abrasividad, al relacionar las pérdidas de masa de las herramientas con las variables entre diferentes pares de tratamientos (adicionalmente fue respaldada con análisis de varianza con prueba de rangos múltiples LSD para cada relación de tratamientos y correlaciones parciales).

Un segundo método fue empleando regresiones multivariadas (numeral 3.3.2), metodología con la que se obtuvo el modelo de la ecuación (3.12), con el siguiente orden en peso de las variables: FR/T, M, MO, W. (las demás variables no fueron consideradas en el modelo debido a su bajo peso).

El tercer método fue basado en análisis dimensional, con el cual se obtuvo la ecuación (2.12) y luego con los resultados experimentales se determinó la ecuación (3.10), en la que el peso de las variables de mayor a menor es: M, Ha/Hm, P, FR/T, MO, Da, W.

No es de extrañar las diferencias en los pesos relativos que adquieren las variables W, P y Da entre los modelos de regresión y de análisis dimensional, téngase presente la Figura 3-19 en la cual se obtuvo mediante análisis con componentes principales que el vector W es contrario a los vectores P y Da, lo que se asocia a que un modelo puede otorgarle un peso equitativo a las tres variables, o darle todo el peso a uno de los vectores como ocurrió con el modelo de regresión múltiple, donde se le dio todo el peso explicativo a W, descartando P y Da; en cambio en el modelo adimensional se le dio todo el peso a P y Da, descartando prácticamente W, con coeficiente 0,001; con la metodología de comparación entre tratamientos se les otorga un peso similar a P y W, y un bajo peso a Da.

Considerando las observaciones de campo y en especial la *comparación entre tratamientos*, el modelo por análisis dimensional no sólo da un orden diferente en peso a algunas de las variables, sino que les asigna unos coeficientes con pesos muy diferentes entre ellas. Por ejemplo el coeficiente 8,10 que le asigna a M es muy alto con relación a los coeficientes de las otras variables, en especial FR/T, que en la *metodología de comparación entre tratamientos*, tuvo el más alto peso. Adicionalmente le otorgó el segundo peso en importancia a Ha/Hm, lo que no corresponde al resultado de la Tabla 3-13 donde la relación Ha/Hm tiene el menor índice de correlación parcial con Yh.

Sin embargo, dado que la ecuación de regresión múltiple se ajustó mejor a la *metodología de comparación entre tratamientos* y que le otorgó a las variables un peso más ajustado de acuerdo a sus índices de correlación parcial con la pérdida de masa Yh, se tomó la decisión de calcular con este tipo de ecuación los índices de abrasividad de los suelos agrícolas (*Ia*).

Mediante análisis de las imágenes de herramientas desgastadas se determinó que hay presencia de desgaste severo, muchos de los surcos superan longitud de 10 mm y la mayoría están orientados en la dirección de trabajo. Sin embargo la pérdida de masa tiende a concentrarse en las partes inferiores de las herramientas y en los vértices, con redondeo de ellos y clara presencia de deformación plástica. Se determinaron seis ecuaciones de redondeo, que concuerdan con las descripciones de desgaste obtenidas por Moore (1975).

Analizando el comportamiento de la Figura 3-15(a) con respaldo de la Tabla 3-16, en el cambio de E21 a E31 (con incremento de Yh de 177%) se destaca la disminución de W (-35%), el incremento de velocidad en 1 km/h y que los dos tratamientos se hicieron en suelo franco arcilloso. Por otro lado, el resultado de la curva fue muy diferente al pasar del tratamiento E22 a E32 (con incremento de Yh de 93%), con disminución similar de W (-30%), igual incremento en la velocidad y en un suelo franco limoso. El alto incremento de desgaste en el suelo franco arcilloso se explica por la sinergia entre el descenso de humedad y el incremento de la velocidad, en un suelo con alta relación FR/T. Esto se verifica con el comportamiento del suelo franco limoso, en el cual su baja relación FR/T no produjo un incremento tan elevado en Yh.

El modelo propuesto para calificación del índice de abrasividad (*Ia*) presentó una alta correlación con las tasas de desgaste de los suelos agrícolas de Cotové. Es un modelo con un alto rango de aplicación, al ser determinado con base en mediciones de campo de dos suelos diferentes (franco arcilloso y franco limoso) y en condiciones de humedad del suelo y densidad aparente con un amplio margen de variación para las condiciones técnicas de operación de una herramienta de cincel. Por lo anterior el modelo puede ser aplicado a múltiples suelos vérticos que se encuentren en las condiciones límites fijadas en la Tabla 3-21. Utilizando el modelo *Ia* se calificó el suelo del tratamiento E31, que dio, como era de esperarse, con el mayor grado de abrasividad respecto a los otros tratamientos.

Antes de realizar la presente investigación se esperaba que la potencia presentará una alta correlación con el desgaste. Sin embargo la correlación se ubicó en valores entre medios y bajos. Posiblemente los intervalos de variación de la potencia (en función de la velocidad de trabajo) no fueron muy amplios, pues los experimentos se realizaron a

velocidades entre 2 y 4 km/h, el cual es un rango normal de operación de los arados de cincel rígidos.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

El modelo propuesto para calificar el índice de abrasividad (I_a) tuvo una alta correlación con la cantidad de desgaste de las herramientas agrícolas utilizadas en los suelos estudiados.

Los modelos de regresión múltiple y de análisis dimensional explican de manera adecuada la abrasividad de los suelos agrícolas vérticos del lote experimental seleccionado, pero el peso de las variables incluidas en el modelo de regresión múltiple correlaciona de manera más ajustada con los datos experimentales.

La relación fragmentos de roca – tierra fina (FR/T) y morfología de las partículas de suelo determinada por el método de puntas (M-SPQ) fueron las variables que tuvieron mayor peso en las metodologías desarrolladas para explicar la abrasividad de los tipos de suelos de la región de estudio. Las otras variables (contenido de materia orgánica, humedad gravimétrica, densidad aparente, consumo de potencia y relación dureza de partículas/dureza de herramientas) se ubicaron entre niveles medios y bajos, según el tipo de metodología aplicada.

En los suelos franco arcillosos con alta relación FR/T y bajo contenido de humedad del suelo (W), leves incrementos de velocidad de operación generan sinergias con consecuencia directa en altas cantidades de desgaste en las herramientas de cincel utilizadas. Este tipo de comportamiento no se presentó en los suelos franco limosos con bajo relación FR/T y bajo contenido de humedad del suelo (W), con leves incrementos de velocidad de operación.

La correlación parcial del consumo de potencia con la cantidad de desgaste de las herramientas de cincel, se ubicó en niveles medios, en relación con otras variables consideradas para explicar la abrasividad de estos tipos de suelos.

Las cantidades de desgaste fueron sensibles al tipo de suelo. En el suelo franco arcilloso con mayor relación FR/T, el desgaste siempre fue mayor que en los suelos franco limosos con menor relación FR/T. Así mismo, la cantidad de desgaste fue más sensible a los cambios de velocidad en los suelos franco arcillosos con mayor relación FR/T, que en los suelos franco limosos con menor relación FR/T.

Toda la variabilidad espacial encontrada en los suelos estudiados puede estar relacionada con el uso agrícola intensivo en labores de labranza con diferentes equipos agrícolas, a que han estado sometidos este tipo de suelos por más de 30 años.

4.2 Recomendaciones

Respaldar los resultados de campo con medidas de laboratorio bajo condiciones controladas, mediante la fabricación de tribómetros que permitan aislar variables de interés.

Emplear otros métodos para cuantificar el consumo de potencia, por ejemplo implementando celdas de carga en diferentes sitios del enganche del tractor – implemento.

Utilizar los dos modelos propuestos (regresión múltiple y análisis dimensional) para cuantificar el desgaste de herramientas de arado de cincel, en suelos vérticos de otras regiones, para determinar sus límites y posibles modificaciones que se le puedan realizar.

Utilizar el modelo de índice de abrasividad (I_a) propuesto para determina la abrasividad de suelos vérticos de otras regiones, para determinar sus límites y posibles modificaciones que se le puedan realizar.

A medida que mejore la resolución de imágenes digitales, reevaluar el método de perímetros (MP) para cuantificar la morfología de partículas de suelos agrícolas, al considerarse que es un método promisorio por su sencilla aplicación.

A. Anexo: lenguaje utilizado para el desarrollo del programa angulosidad.

El siguiente programa fue desarrollado por el Ingeniero de sistemas John Fredy Medina en el año 2010, el cual funciona bajo ambiente Matlab.

```
function [mperimetro,mmpsqs]= angulosidad7 (imagen, obj)
Z=imread(imagen);
B=rgb2gray(Z);
[c,d]=size(B);
l=graythresh(B);
T=~im2bw(B,l);
se =strel('diamond',2);
F=imopen(T,se);
H=F;
for i=1:5
    G=medfilt2(H,[3 3]);
    H=G;
end
BW3=bwfill(H,'holes');
[labeled,numObjects] = bwlabel(BW3,8);
objetos = regionprops(labeled,'all');
psq=[0.0011];
contob=1;
for v=1:numObjects
    if obj(v)==1
        BW2=bwperim(BW3);
        borde=bwperim(labeled);
        ferritat=objetos(v).Area;
        numimg=objetos(v).Centroid;
        cuadro=objetos(v).BoundingBox;
        perimo=objetos(v).Perimeter;
        r=sqrt(objetos(v).Area/pi);
        perimc=2*pi*r;
        perimetro(contob)=(perimo-perimc)/perimo;
        [x,y] = meshgrid(1:d, 1:c);
        circulos = sqrt((x-numimg(1)).^2 + (y-numimg(2)).^2) <= r;
        cborde=bwperim(circulos);
        i=1;
        for e=1:c
```

```

for f=1:d
    if (borde(e,f)==cborde(e,f) & borde(e,f)==1 & cborde(e,f)==1);
        fila(i)=e;
        colum(i)=f;
        i=i+1;
    end
end
interc=i-1;
objeto = bwtraceboundary(labeled,[fila(1),colum(1)],'NE');
[tam1f,tam1c]=size(objeto);
cont1=1;
tamano=r;
contp=1;
while (cont1<=tam1f-1)
    intercepto=0;
    tamanot=0;
    for j=1:interc
        if (objeto(cont1,1)==fila(j) & objeto(cont1,2)==colum(j));
            puntaf(1)=objeto(cont1,1);
            puntac(1)=objeto(cont1,2);
            cont1=cont1+1;
        end
    end
    tamanot=sqrt((objeto(cont1,1)-numimg(2))^2 + ((objeto(cont1,2)-numimg(1))^2));
    if (tamanot>tamano)
        while (intercepto<1)
            if (tamanot>tamanot)
                tamanot=tamanot;
                picof(1)=(objeto(cont1,1));
                picoc(1)=(objeto(cont1,2));
            end
            cont1=cont1+1;
            tamanot=sqrt((objeto(cont1,1)-numimg(2))^2 + ((objeto(cont1,2)-
numimg(1))^2));
            for k=1:interc
                if (objeto(cont1,1)==fila(k) & objeto(cont1,2)==colum(k));
                    intercepto=2;
                end
            end
        end
        puntaf(2)=objeto(cont1,1);
        puntac(2)=objeto(cont1,2);
        rp=sqrt((picof(1)-numimg(2))^2 + ((picoc(1)-numimg(1))^2));
        if(rp>=tamano*1.011)
            ladao=sqrt((puntaf(1)-puntaf(2))^2 + ((puntac(1)-puntac(2))^2));
            ladob=sqrt((puntaf(1)-picof(1))^2 + ((puntac(1)-picoc(1))^2));
            ladoc=sqrt((picof(1)-puntaf(2))^2 + ((picoc(1)-puntac(2))^2));
            teta= acos((ladob^2+ladoc^2-ladao^2)/(2*ladob*ladoc));
            psq(contp)= cos(teta/2);
            contp=contp+1;
        end
    end
end

```

```

        end
        clear puntaf;
        clear puntac;
    else
        cont1=cont1+1;
        clear puntaf;
        clear puntac;
    end
end
end
mpsq(contob)=mean(psq);
contob=contob+1;
end
end
mperimetro=mean(perimetro)
mmpsqa=mean(mpsqa)
clear perimetro;
clear psq;
clear mpsqa;

function n= angulosidad6(imagen)
Z=imread(imagen);
B=rgb2gray(Z);
[c,d]=size(B);
l=graythresh(B);
T=~im2bw(B,l);
se =strel('diamond',2);
F=imopen(T,se);
H=F;
for i=1:5
    G=medfilt2(H,[3 3]);
    H=G;
end
aleat=num2str(rand(1)*10);
l='C:\imagenes\ang';
m='.jpg';
n=[l aleat m]
BW3=bwfill(H,'holes');
[labeled,numObjects] = bwlabel(BW3,8);
objetos = regionprops(labeled,'all');
imshow(BW3);
hold on
for w = 1:numObjects
    x = objetos(w).Centroid;
    text(x(1), x(2), sprintf('%d', w), 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment',
'middle', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 14, 'Color',[1,0,0]);
end
hold off
imwrite(BW3,n);

```


B. Anexo: procedimiento para determinar datos con base en mapas kriging.

A manera de ejemplo, se explicará para el caso de determinación de gravillas en cada una de las líneas experimentales).

- (1) Se realizó un muestreo en red en el lote experimental (ver Figura 2.2), luego se tamizaron las muestras y se separaron las gravillas de la tierra fina y de los otros FR. Obsérvese la siguiente Tabla de los resultados obtenidos en el muestreo y tamizado del lote de estudio (las gravillas tienen un tamaño entre 2 – 75 mm).

x (m)	y (m)	Gravillas (g) (2 - 75) mm	Log10(Gravillas)	Residuales de Log10(Gravillas)
0	0	233,01	2,36737455987	-0,0862445
10	0	222,66	2,34764220473	-0,16637
24	0	233,90	2,36903022181	-0,183068
38	0	424,64	2,62802090118	0,0920473
52	0	330,77	2,51952611326	0,0538866
66	0	289,81	2,46211336688	0,121018
80	0	138,44	2,14126159062	-0,0210807
0	10	283,41	2,45241517008	0,142066
10	10	885,06	2,94697271339	0,581971
24	10	487,60	2,68806369695	0,293013
38	10	603,85	2,78092907064	0,41004
52	10	289,64	2,46185853881	0,16934
66	10	100,55	2,00238207493	-0,157556
80	10	89,66	1,95259873453	-0,0205491
0	20	161,80	2,20897851728	0,020758
10	20	155,99	2,19309675807	-0,0440361
24	20	256,05	2,40832478017	0,14918
38	20	93,33	1,97002126583	-0,256926
52	20	151,46	2,18029795249	0,0397586
66	20	51,56	1,71231290868	-0,287609
74	20	64,64	1,81050134777	-0,0847289
0	30	54,24	1,73431968086	-0,352914
10	30	136,69	2,13573674351	0,00533123
24	30	47,68	1,67833624673	-0,466044
38	30	209,26	2,32068622098	0,21654

52	30	40,13	1,60346915973	-0,406233
66	30	95,73	1,98104805891	0,12
0	40	222,78	2,34787619961	0,340488
10	40	46,12	1,66388929862	-0,380931
24	40	26,80	1,42813479403	-0,622623
38	40	94,07	1,97345114402	-0,0290357
52	40	81,23	1,90971645323	0,00971064
61	40	14,28	1,15472820744	-0,650771
0	49	35,33	1,54814363743	-0,40546
10	49	64,76	1,81130684008	-0,174562
24	49	66,72	1,82425603763	-0,160318
38	49	110,56	2,04359803003	0,114528
52	49	195,29	2,29068000542	0,471324
0	60	48,78	1,68824179598	-0,222881
10	60	78,86	1,89685677274	-0,0402167
24	60	98,90	1,9951962916	0,068258
38	60	84,70	1,92788341033	0,0652899
48	60	1767,22	3,24729061789	1,46385
0	70	120,47	2,08087891034	0,186176
10	70	92,60	1,96661098668	0,0516983
24	70	155,12	2,19066779607	0,293927
38	70	108,36	2,03486899636	0,21051
0	80	245,72	2,39044050665	0,491016
10	80	221,37	2,34511876506	0,431225
24	80	53,48	1,72819139859	-0,159494
34	80	29,74	1,47334096419	-0,362434
0	90	319,93	2,50505496601	0,579767
10	90	62,43	1,79539333493	-0,138623
24	88	19,02	1,2792105126	-0,616452
0	98	103,03	2,01296369983	0,0517635
10	98	31,02	1,49164179348	-0,473695
25	93,8	42,81	1,63154522783	-0,273623

(2) Resultados estadísticos de las muestras de gravillas

Estadístico	Resultado	Observaciones
Shapiro-Wilks	0,563073	No es distribución normal con 99% de confianza
Valor P	0,0	
Simetría estándar	13,52	No simétrica; se deben transformar los datos

(3) Se transformó la variable mediante una función Log10

Estadístico	Resultado	Observaciones
Simetría estándar	0,92	Simétrica
r ² de regresión*	25,87	Tiene modelo; se determinaron los residuales
Shapiro-Wilks	0,9887	Los residuales tienen

Valor P (de los residuales)	0,957492	distribución normal con un 90% de confianza
Simetría estándar (de los residuales)	0,917093	Los residuales son simétricos
Bartlett Valor P	1,52957 0,104259	Hay homogeneidad de varianza en las coordenadas y del lote (que coincide con el sentido de trabajo del cincel, donde más del 90% del desplazamiento es en sentido del eje y)

Tabla 8.2. Análisis de tendencia de log10 gravillas

Variable	Modelo	R ² (%)	Valor p del modelo
Log10gravillas	$\text{Log10gravillas} = 2.45362 + 0.00742225*X - 0.0153841*Y - 0.0000574054*X*Y - 0.00013829*X*X + 0.000105708*Y*Y$	25,87	0.0078

(4) Se determinó la semivarianza de los residuales de Log10gravillas, empleando el programa GS+

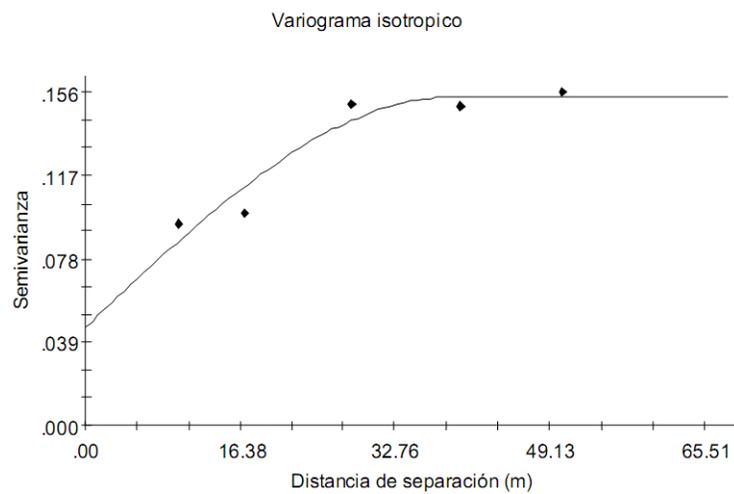
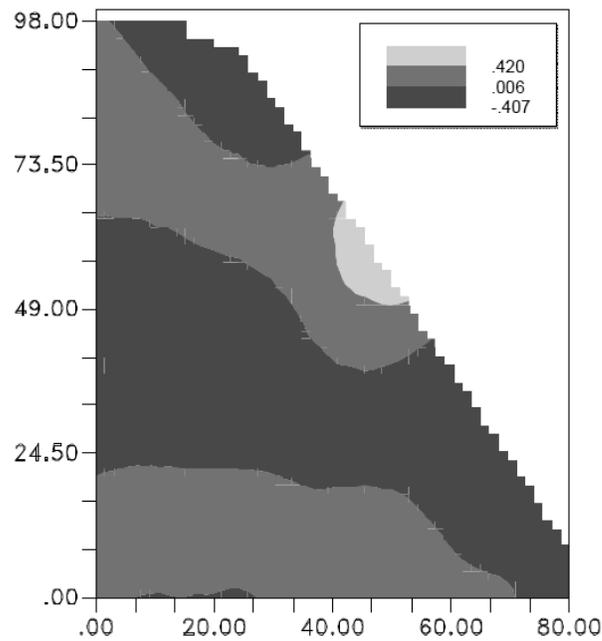


Tabla 8.3. Dependencia espacial de los residuales de log10 gravillas

Variable	Modelo	Co	Sill	Rango (m)	C/Sill (%)	R ² (%)
Residuales						
Log10gravillas	Esférico	0,047	0,154	38,70	69,5	92,1

- (5) Con la información anterior se graficó el mapa kriging puntual para los residuales de Log10 de las gravillas. El mapa fue útil para seleccionar las líneas experimentales (ver sección 2.4). En la Figura siguiente, a medida que se incrementa el tono oscuro, disminuye las gravillas en el lote experimental (las medidas (x,y) se dan en m).



C. Anexo: método de Gauss aplicado a la solución de la ecuación dimensional de abrasividad de suelos agrícolas.

Mediante la técnica de análisis dimensional se encontró la siguiente ecuación (ver en el numeral 2.6.4 la demostración):

$$Y_h = c_1 \cdot (W \cdot Da / FR)^{c_2} \cdot (MO \cdot Da / FR)^{c_3} \cdot (T / FR)^{c_4} \cdot (M)^{c_5} \cdot (Ha / H_m)^{c_6} \cdot (P \cdot Da^{1/3} / FR^{1/3}) \quad (1)$$

Los parámetros Da , FR , Ha , W , MO , M , T , P y Y_h , se encontraron mediante experimentos de campo en el lote No. 8 de Cotové y H_m se determinó empleando un durómetro que midió la dureza superficial en las platinas. Las incógnitas que se hallaron correspondieron a los coeficientes y exponentes c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 . El sistema estaba compuesto por seis incógnitas, por lo que se plantearon 57 ecuaciones (mínimo debían ser seis) que permitieron su solución, para dos suelos diferentes con tres niveles de velocidad.

Solución del sistema empleando el método matricial de Gauss.

Sea:

A: $(W \cdot Da / FR)$

B: $(MO \cdot Da / FR)$

C: (T / FR)

D: (M)

E: (Ha / H_m)

F: $(P \cdot Da^{1/3} / FR^{1/3})$

Reescribiendo la ecuación (1):

$$Y_h = c_1 \cdot A^{c_2} \cdot B^{c_3} \cdot C^{c_4} \cdot Da^{c_5} \cdot E^{c_6} \cdot F \quad (2)$$

Tomando Ln a ambos lados de la ecuación, se tiene:

$$\ln Y_h = \ln c_1 + \ln A^{c_2} + \ln B^{c_3} + \ln C^{c_4} + \ln Da^{c_5} + \ln E^{c_6} + \ln F$$

$$\ln Y_h = \ln c_1 + c_2 \ln A + c_3 \ln B + c_4 \ln C + c_5 \ln Da + c_6 \ln E + \ln F \quad (3)$$

Con el objeto de simplificar momentáneamente la ecuación (3) se procedió a reemplazar por letras prima cada uno de los coeficientes afectados por Ln.

$$Yh' = c1' + c2 A' + c3 B' + c4 C' + c5 D' + c6 E' + F'$$

$$Yh' = c1' + A'c2 + B'c3' + C'c4 + D'c5 + E'c6 + F' \quad (4)$$

Se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones lineales para dos suelos diferentes y tres niveles de velocidad:

$$Yh1' - F'1 = c1' + A1'c2 + B1'c3' + C1'c4 + D1'c5 + E1'c6' \quad (5)$$

$$Yh2' - F'2 = c1' + A2'c2 + B2'c3' + C2'c4 + D2'c5 + E2'c6 \quad (6)$$

$$Yh3' - F'3 = c1' + A3'c2 + B3'c3' + C3'c4 + D3'c5 + E3'c6 \quad (7)$$

$$Yh4' - F'4 = c1' + A4'c2 + B4'c3' + C4'c4 + D4'c5 + E4'c6 \quad (8)$$

$$Yh5' - F'5 = c1' + A5'c2 + B5'c3' + C5'c4 + D5'c5 + E5'c6 \quad (9)$$

$$Yh6' - F'6 = c1' + A6'c2 + B6'c3' + C6'c4 + D6'c5 + E6'c6 \quad (10)$$

Este sistema de ecuaciones fue posible expresarlo con la matriz aumentada Abrasividad Ab:

$$Ab = \begin{bmatrix} 1 & A1' & B1' & C1' & D1' & E1' & . & Yh1' - F'1 \\ 1 & A2' & B2' & C2' & D2' & E2' & . & Yh2' - F'2 \\ 1 & A3' & B3' & C3' & D3' & E3' & . & Yh3' - F'3 \\ 1 & A4' & B4' & C4' & D4' & E4' & . & Yh4' - F'4 \\ 1 & A5' & B5' & C5' & D5' & E5' & . & Yh5' - F'5 \\ 1 & A6' & B6' & C6' & D6' & E6' & . & Yh6' - F'6 \end{bmatrix}$$

Los coeficientes de la matriz Ab, luego de los experimentos en Cotové, tomaron valores positivos, negativos o cero. Obsérvese que el coeficiente de c1 en la matriz A es igual a 1.

Las condiciones físicas del suelo al momento de realizar los experimentos de campo se vieron reflejadas en el valor que registraron los coeficientes de la matriz abrasividad Ab, durante el muestreo de campo.

D. Anexo: mediciones iniciales de las variables de abrasividad en el lote experimental de Cotové (Abril, 2008).

Granulometría (g)

Coordenadas		Arcillas (g)	Limos (g)	Arenas (g) (Fraccionadas)					Arenas total (g)	Gravillas (g) (Fraccionadas)			Gravillas total (g)	Gravas (g)
X (m)	Y (m)			Muy fina	Fina	Media	Gruesa	Muy Gruesa		Fina	Media	Gruesa		
0	0	804.2	804.5	90.6	118.2	102.6	128.6	53.6	493.6	36.3	46.4	150.3	233.0	1268.0
10	0	781.7	846.9	83.2	117.0	118.6	190.6	78.4	587.9	56.8	85.8	80.1	222.7	467.3
24	0	887.3	819.7	99.1	127.3	127.8	296.5	138.3	789.0	98.6	124.2	11.1	233.9	0.0
38	0	968.3	968.3	187.8	186.0	190.6	344.9	138.1	1047.4	168.8	92.0	163.9	424.6	0.0
52	0	915.6	845.1	125.2	151.8	147.5	267.5	125.2	817.2	99.5	60.3	171.0	330.8	371.2
66	0	878.4	878.4	90.8	125.6	156.6	299.7	115.7	788.4	92.4	91.9	105.5	289.8	0.0
80	0	812.8	692.7	86.7	113.2	159.4	273.4	56.4	689.0	100.6	31.2	6.7	138.4	0.0
0	10	1080.1	997.4	124.6	140.2	156.4	365.6	185.4	972.3	120.7	130.3	32.3	283.4	0.0
10	10	870.3	1022.0	99.2	129.2	141.2	283.3	129.6	782.5	196.2	231.7	457.1	885.1	0.0
24	10	1022.5	1023.3	110.7	156.8	188.0	339.0	121.8	916.3	146.1	117.7	223.8	487.6	122.1
38	10	910.1	840.1	106.3	96.7	145.8	430.1	133.5	912.4	145.0	98.5	360.3	603.8	0.0
52	10	590.9	752.4	103.4	99.2	91.4	240.5	76.3	610.8	99.1	69.3	121.3	289.6	0.0
66	10	862.4	862.4	100.4	137.6	203.0	415.8	102.0	958.8	78.9	8.3	13.3	100.6	0.0
80	10	627.9	627.9	94.9	79.5	105.7	225.3	38.3	543.7	49.4	19.1	21.1	89.7	0.0
0	20	922.7	999.6	107.8	134.1	177.5	296.3	100.2	815.9	105.4	37.6	18.9	161.8	0.0
10	20	1159.2	1070.5	127.3	159.6	160.2	213.9	81.2	742.2	64.0	39.5	52.5	156.0	0.0
24	20	962.9	963.6	104.2	175.2	135.4	348.9	104.2	867.9	67.4	24.6	164.1	256.1	0.0
38	20	918.7	782.6	101.7	117.0	127.8	130.4	34.0	510.9	18.9	26.9	47.6	93.3	0.0
52	20	1168.0	1078.2	115.0	134.4	151.3	212.5	70.2	683.3	39.7	83.0	28.7	151.5	0.0
66	20	761.2	824.7	116.5	124.9	119.7	342.0	89.5	792.6	45.6	5.9	0.0	51.6	787.6
74	20	840.7	840.7	81.9	94.9	115.9	256.3	61.2	610.3	56.0	8.7	0.0	64.6	0.0

0	30	983.8	983.8	116.0	144.2	111.9	188.2	64.7	625.1	27.5	26.7	0.0	54.2	0.0
10	30	831.0	831.3	179.2	158.8	170.1	264.8	114.6	887.4	92.0	10.1	34.6	136.7	0.0
24	30	1036.5	1123.3	173.3	169.3	157.9	185.2	30.8	716.5	37.0	10.7	0.0	47.7	0.0
38	30	718.6	718.9	128.3	120.0	121.3	221.5	60.0	651.0	55.1	111.8	42.3	209.3	0.0
52	30	883.5	815.6	122.5	92.6	75.7	220.4	80.5	591.7	37.9	2.3	0.0	40.1	0.0
66	30	959.4	959.8	132.3	145.0	133.3	213.1	50.5	674.2	63.2	15.7	16.8	95.7	0.0
0	40	183.5	1345.3	90.9	104.0	94.5	107.2	37.3	433.9	46.3	25.1	151.4	222.8	0.0
10	40	1037.4	1037.8	146.3	145.8	120.9	148.2	37.6	598.8	30.2	15.9	0.0	46.1	0.0
24	40	335.8	1762.9	153.2	142.7	122.1	210.4	33.9	662.2	9.9	5.2	11.8	26.8	0.0
38	40	991.8	1074.9	177.7	204.8	144.0	178.2	48.0	752.7	43.9	33.2	17.0	94.1	0.0
52	40	210.2	1891.8	218.0	215.8	142.5	131.4	34.7	742.3	35.5	38.3	7.4	81.2	0.0
61	40	201.5	2317.1	363.3	326.6	180.4	101.1	8.4	979.8	6.7	7.5	0.0	14.3	0.0
0	49	239.2	1469.7	161.2	170.4	109.6	122.0	35.2	598.4	30.5	4.9	0.0	35.3	0.0
10	49	895.5	1051.2	205.2	218.1	172.3	191.8	30.5	817.9	57.0	7.7	0.0	64.8	0.0
24	49	949.0	1114.1	149.7	172.9	139.2	190.8	23.7	676.4	40.7	26.0	0.0	66.7	0.0
38	49	983.4	1128.7	190.7	198.9	141.2	197.3	61.2	789.3	69.7	24.1	16.8	110.6	0.0
52	49	929.7	1183.2	248.2	222.8	145.8	179.9	51.7	848.4	69.3	63.9	62.0	195.3	0.0
0	60	939.1	939.1	152.7	156.4	126.2	151.3	40.4	627.0	28.1	5.3	15.3	48.8	0.0
10	60	966.3	966.7	176.6	187.6	141.8	187.1	75.6	768.6	62.2	16.7	0.0	78.9	0.0
24	60	976.4	901.3	175.4	191.5	160.3	135.0	58.0	720.3	23.4	75.5	0.0	98.9	0.0
38	60	909.3	1157.3	117.0	123.5	90.1	204.5	62.3	597.4	42.8	22.6	19.4	84.7	0.0
48	60	531.5	575.8	165.3	131.1	124.9	182.2	61.3	664.7	204.3	864.0	699.0	1767.2	258.7

0	70	857.0	928.5	120.9	143.8	127.9	286.7	86.1	765.5	40.9	42.1	37.4	120.5	0.0
10	70	1000.8	1001.2	145.1	143.4	156.1	253.6	80.3	778.4	50.6	31.3	10.7	92.6	0.0
24	70	816.6	884.6	155.8	184.0	149.3	247.6	91.8	828.5	64.4	54.7	36.0	155.1	0.0
38	70	239.1	1753.7	169.4	147.9	169.4	229.5	38.5	754.7	33.4	25.9	49.1	108.4	0.0
0	80	734.8	796.0	99.2	96.6	110.6	375.7	116.8	798.9	104.1	90.5	51.1	245.7	0.0
10	80	770.5	834.7	96.9	112.1	136.9	333.9	134.6	814.3	82.4	78.9	60.0	221.4	0.0
24	80	878.4	878.4	108.1	101.7	101.7	353.2	75.6	740.3	24.2	18.8	10.4	53.5	0.0
34	80	922.9	922.9	93.6	99.0	95.6	364.1	75.5	727.7	7.7	22.0	0.0	29.7	0.0
0	90	866.1	866.1	102.3	124.4	110.1	209.6	91.7	638.1	179.2	126.9	13.9	319.9	0.0
10	90	783.1	848.4	95.6	84.4	63.4	340.5	139.0	723.0	47.6	14.8	0.0	62.4	0.0
24	88	887.6	887.6	90.9	98.8	121.3	272.6	49.4	632.9	10.5	8.5	0.0	19.0	0.0
0	98	171.1	1540.3	103.6	125.2	140.8	225.4	39.0	634.0	68.1	22.2	12.8	103.0	0.0
10	98	907.5	907.5	81.5	101.6	94.9	189.8	46.1	513.9	20.0	11.0	0.0	31.0	0.0
25	93.8	255.9	1572.0	104.4	150.0	166.1	218.8	57.9	697.2	36.0	6.8	0.0	42.8	0.0
Media		798.77	1026.53	132.76	143.40	134.95	240.59	74.67	726.38	66.10	59.66	63.24	189.00	57.46
Desviación est		259.97	322.08	49.31	43.18	29.53	80.35	37.45	129.23	46.55	117.16	122.38	263.41	210.36

E. Anexo: resultados de las variables de abrasividad en las coordenadas de las líneas experimentales.

(1) Humedad volumétrica (W) y Densidad aparente (Da) del suelo en cada tratamiento y línea experimental

Tratamiento	Línea	Coordenadas		Wg (%)	D* (Mg m ⁻³)	D (Mg m ⁻³)	W* (%)	W** (%)	W (m ³)	D (N m ⁻³)
		X (m)	Y (m)							
E11	1	0.00	20.90	20.62	1.45	1.34	29.90	35.75	1.80	13141.38
		27.69	16.22	33.82	1.23		41.60			
	2	27.69	16.22	33.82	1.23	1.32	41.60	36.87	1.86	12896.21
		55.68	11.15	22.96	1.40		32.14			
	3	55.68	11.15	22.96	1.40	1.31	32.14	35.49	1.79	12798.14
		79.99	7.70	32.09	1.21		38.83			
	4	0.00	22.10	24.27	1.43	1.33	34.71	33.62	1.69	13043.31
		27.69	17.42	26.46	1.23		32.54			
	5	27.69	17.42	26.46	1.23	1.22	32.54	30.81	1.55	11964.54
		55.68	12.35	24.04	1.21		29.09			
6	55.68	12.35	24.04	1.21	1.31	29.09	35.00	1.76	12847.17	
	4.08	22.74	29.01	1.41		40.90				
7	4.08	22.74	29.01	1.41	1.33	40.90	37.65	1.90	13043.31	
	31.95	17.78	27.52	1.25		34.40				
8	31.95	17.78	27.52	1.25	1.32	34.40	34.22	1.72	12896.21	
	59.47	13.00	24.66	1.38		34.03				
9	0.00	24.50	24.90	1.25	1.34	31.13	33.35	1.68	13141.38	
	27.69	19.82	24.88	1.43		35.57				
10	27.69	19.82	24.88	1.43	1.40	35.57	38.47	1.94	13729.80	
	55.68	14.75	30.19	1.37		41.36				
E21	11	30.90	34.72	28.24	1.36	1.28	38.41	35.86	1.81	12552.96
		61.22	27.32	27.77	1.20		33.32			
	12	30.90	35.72	27.53	1.35	1.30	37.17	33.99	1.71	12749.10
		61.22	28.32	24.65	1.25		30.82			
	13	30.90	36.72	28.22	1.35	1.31	38.10	34.93	1.76	12847.17
		61.22	29.32	25.01	1.27		31.76			
	14	30.90	37.72	29.35	1.34	1.31	39.33	36.17	1.82	12847.17
		61.22	30.32	25.79	1.28		33.02			
	15	30.90	38.72	30.73	1.25	1.35	38.41	38.22	1.93	13239.45
		61.22	31.32	26.23	1.45		38.03			
	16	30.90	39.72	31.02	1.41	1.36	43.73	37.62	1.90	13337.52
		61.22	32.32	24.05	1.31		31.51			
17	30.90	40.72	27.09	1.43	1.40	38.74	37.30	1.88	13729.80	
	61.22	33.32	26.17	1.37		35.85				
18	30.90	41.72	28.67	1.35	1.34	38.71	36.97	1.86	13141.38	
	61.22	34.32	26.49	1.33		35.23				
19	30.90	42.72	26.32	1.34	1.33	35.27	36.69	1.85	13043.31	
	61.22	35.32	28.87	1.32		38.11				
20	30.90	43.72	27.05	1.30	1.35	35.16	37.22	1.88	13239.45	
	61.22	36.32	28.05	1.40		39.27				

E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	30.49 31.80	1.27 1.30	1.29	38.72 41.34	40.03	2.02	12602.00
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	34.91 29.01	1.37 1.40	1.39	47.83 40.61	44.22	2.23	13582.70
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	28.37 29.48	1.38 1.41	1.40	39.14 41.56	40.35	2.03	13680.77
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	31.96 30.97	1.31 1.31	1.31	41.87 40.57	41.22	2.08	12847.17
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	33.51 27.95	1.42 1.45	1.44	47.59 40.53	44.06	2.22	14073.05
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	32.26 27.95	1.42 1.25	1.34	45.80 34.93	40.37	2.03	13092.35
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	28.97 28.93	1.40 1.42	1.41	40.56 41.08	40.82	2.06	13827.87
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	29.69 31.67	1.35 1.37	1.36	40.08 43.38	41.73	2.10	13337.52
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	30.41 28.08	1.26 1.43	1.35	38.31 40.15	39.23	1.98	13190.42
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	30.24 28.86	1.33 1.33	1.33	40.23 38.39	39.31	1.98	13043.31
E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	27.64 28.96	1.24 1.46	1.35	34.27 42.28	38.28	1.93	13239.45
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	25.80 23.27	1.39 1.42	1.41	35.86 33.04	34.45	1.74	13778.84
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	29.46 32.13	1.30 1.32	1.31	38.30 42.41	40.36	2.03	12847.17
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	28.39 25.97	1.34 1.36	1.35	38.04 35.31	36.68	1.85	13239.45
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	23.52 29.44	1.32 1.38	1.35	31.05 40.63	35.84	1.81	13239.45
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	25.74 42.62	1.37 1.30	1.34	35.26 55.41	45.34	2.28	13092.35
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	24.93 26.37	1.33 1.36	1.35	33.16 35.86	34.51	1.74	13190.42
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	27.54 23.74	1.35 1.38	1.37	37.18 32.77	34.98	1.76	13386.56
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	26.16 26.48	1.29 1.33	1.31	33.75 35.22	34.48	1.74	12847.17
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	23.74 23.40	1.33 1.19	1.26	31.58 27.84	29.71	1.50	12356.82
E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	20.47 21.07	1.36 1.41	1.39	27.84 29.70	28.77	1.45	13582.70
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	20.65 19.17	1.37 1.39	1.38	28.29 26.65	27.47	1.38	13533.66
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	22.75 19.99	1.43 1.42	1.43	32.53 28.39	30.46	1.54	13974.98
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	20.44 20.77	1.40 1.39	1.40	28.61 28.87	28.74	1.45	13680.77
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	21.47 21.78	1.38 1.40	1.39	29.62 30.50	30.06	1.52	13631.73
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	22.24 21.86	1.44 1.27	1.36	32.02 27.77	29.90	1.51	13288.49
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	26.88 18.48	1.45 1.28	1.37	38.97 23.66	31.32	1.58	13386.56
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	29.30 20.06	1.41 1.34	1.38	41.32 26.87	34.10	1.72	13484.63
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	18.70 19.17	1.42 1.36	1.39	26.56 26.07	26.32	1.33	13631.73
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	21.94 17.47	1.44 1.28	1.36	31.59 22.36	26.97	1.36	13337.52

E13	51	30.90	14.75	16.99	1.44	1.37	24.47	23.92	1.21	13386.56
		58.30	9.44	18.11	1.29		23.36			
	52	30.90	13.75	18.07	1.38	1.38	24.94	24.94	1.26	13533.66
		58.30	8.44	18.07	1.38		24.94			
	53	30.90	12.75	18.35	1.47	1.45	26.97	26.18	1.32	14220.15
		58.30	7.44	17.76	1.43		25.40			
	54	30.90	11.75	18.66	1.46	1.44	27.25	26.56	1.34	14122.08
		58.30	6.44	18.22	1.42		25.87			
55	30.90	10.75	17.89	1.49	1.38	26.66	23.47	1.18	13533.66	
	58.30	5.44	15.97	1.27		20.28				
56	30.90	9.75	18.33	1.62	1.44	29.70	24.83	1.25	14073.05	
	58.30	4.44	15.97	1.25		19.97				
57	30.90	8.75	17.07	1.45	1.45	24.76	24.57	1.24	14171.12	
	58.30	3.44	16.93	1.44		24.38				
58	30.90	7.75	18.50	1.48	1.43	27.38	25.81	1.30	13974.98	
	58.30	2.44	17.69	1.37		24.23				

Wg: Humedad gravimétrica _ bs

D*: Densidad aparente en cada extremo de la línea; D:Densidad aparente (promedio)

W*: Humedad volumétrica (Wg * D)

W**: Humedad volumétrica media en la línea

W: humedad volumetrica en m³ [volumen influencia: (28 * 0.3 * 0.6)m³]

(2) Tierra fina (T) del suelo en cada tratamiento y línea experimental

Tratamiento	Línea	Coordenadas		T* (N)	T** (N)	T (N)
		X (m)	Y (m)			
E11	1	0.00	20.90	26.82	26.82	67598.45
		27.69	16.22	26.82		
	2	27.69	16.22	26.82	24.44	61590.39
		55.68	11.15	22.06		
	3	55.68	11.15	22.06	20.37	51336.60
		79.99	7.70	18.69		
	4	0.00	22.10	26.64	26.55	66902.03
		27.69	17.42	26.46		
	5	27.69	17.42	26.46	24.49	61708.58
		55.68	12.35	22.52		
	6	55.68	12.35	22.52	24.83	62563.70
		4.08	22.74	27.14		
	7	4.08	22.74	27.14	25.86	65158.14
		31.95	17.78	24.58		
	8	31.95	17.78	24.58	24.44	61580.60
		59.47	13.00	24.30		
	9	0.00	24.50	26.34	26.12	65834.09
		27.69	19.82	25.91		
	10	27.69	19.82	25.91	24.88	62706.08
		55.68	14.75	23.85		

E21	11	30.90 61.22	34.72 27.32	25.74 25.27	25.50	64262.13
	12	30.90 61.22	35.72 28.32	25.97 25.21	25.59	64488.96
	13	30.90 61.22	36.72 29.32	26.21 25.15	25.68	64718.73
	14	30.90 61.22	37.72 30.32	26.46 25.03	25.75	64878.75
	15	30.90 61.22	38.72 31.32	26.70 24.86	25.78	64970.06
	16	30.90 61.22	39.72 32.32	26.89 24.69	25.79	64987.62
	17	30.90 61.22	40.72 33.32	27.07 24.75	25.91	65294.16
	18	30.90 61.22	41.72 34.32	27.20 24.80	26.00	65523.50
	19	30.90 61.22	42.72 35.32	27.32 24.92	26.12	65825.94
	20	30.90 61.22	43.72 36.32	27.51 25.09	26.30	66282.22
E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	24.35 27.32	25.84	65111.23
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	24.52 27.51	26.02	65562.56
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	24.63 27.70	26.17	65945.46
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	24.75 27.90	26.32	66330.69
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	24.92 28.02	26.47	66709.07
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	25.09 28.02	26.56	66926.72
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	25.21 28.02	26.62	67072.65
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	25.32 27.96	26.64	67138.04
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	25.44 27.83	26.64	67123.46
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	25.56 27.70	26.63	67110.30

E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	27.64 26.09	26.87	67704.35
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	27.83 26.46	27.14	68403.14
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	28.02 26.76	27.39	69032.22
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	28.15 27.01	27.58	69507.23
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	28.35 27.26	27.80	70068.03
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	28.48 27.58	28.03	70630.64
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	28.55 27.96	28.25	71196.73
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	28.61 28.09	28.35	71442.25
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	28.61 28.22	28.41	71605.61
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	28.48 28.35	28.41	71604.10
E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	24.18 27.20	25.69	64741.82
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	23.91 27.07	25.49	64235.55
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	23.69 26.89	25.29	63724.55
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	23.36 26.70	25.03	63081.82
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	23.10 26.46	24.78	62436.40
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	22.83 26.21	24.52	61797.66
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	22.62 25.97	24.30	61231.10
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	22.36 25.74	24.05	60604.77
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	22.21 25.50	23.85	60113.51
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	22.21 25.21	23.71	59745.72

E13	51	30.90 58.30	14.75 9.44	26.09 23.15	24.62	62046.11
	52	30.90 58.30	13.75 8.44	26.46 23.10	24.78	62436.40
	53	30.90 58.30	12.75 7.44	26.76 23.04	24.90	62755.48
	54	30.90 58.30	11.75 6.44	27.01 23.15	25.08	63201.51
	55	30.90 58.30	10.75 5.44	27.26 23.26	25.26	63651.05
	56	30.90 58.30	9.75 4.44	27.58 23.96	25.77	64939.18
	57	30.90 58.30	8.75 3.44	27.96 23.63	25.80	65008.29
	58	30.90 58.30	7.75 2.44	28.09 23.53	25.81	65034.08

T*: Contenido de tierra fina en cada sitio

T**: Contenido medio de Tierra fina

T: Contenido de Tierra fina en la línea

Nota. Para la proyección se considera que en cada sitio se extrajo un volumen efectivo de 0,2 m x 0,2 m x 0,05 m de T, y con una cantidad de suelo removido por el cincel de: 0,6 m x 28 m x 0,3 Por lo tanto:

Volumen mincalicata (m³): 0.002

Volumen removido (m³): 5.04

(3) Cantidad de fragmentos de roca en cada tratamiento y línea experimental (se omitieron las gravas por razones previamente sustentadas)

Tratamiento	Línea	Coordenadas		FR* (N)	FR** (N)	FR (N)
		X (m)	Y (m)			
E11	1	0.00	20.90	1.76	2.14	5381.51
		27.69	16.22	2.51		
	2	27.69	16.22	2.51	2.17	5459.26
		55.68	11.15	1.82		
	3	55.68	11.15	1.82	1.45	3651.53
		79.99	7.70	1.08		
	4	0.00	22.10	1.35	1.75	4421.57
		27.69	17.42	2.16		
	5	27.69	17.42	2.16	1.94	4878.11
		55.68	12.35	1.72		
6	55.68	12.35	1.72	1.53	3867.97	
	4.08	22.74	1.35			
7	4.08	22.74	1.35	1.74	4378.15	
	31.95	17.78	2.12			
8	31.95	17.78	2.12	1.75	4397.90	
	59.47	13.00	1.37			
9	0.00	24.50	1.18	1.57	3945.46	
	27.69	19.82	1.95			
10	27.69	19.82	1.95	1.72	4343.08	
	55.68	14.75	1.49			

E21	11	30.90 61.22	34.72 27.32	0.74 0.61	0.68	1701.03
	12	30.90 61.22	35.72 28.32	0.73 0.58	0.65	1646.58
	13	30.90 61.22	36.72 29.32	0.71 0.56	0.63	1596.03
	14	30.90 61.22	37.72 30.32	0.69 0.54	0.62	1554.54
	15	30.90 61.22	38.72 31.32	0.68 0.52	0.60	1512.40
	16	30.90 61.22	39.72 32.32	0.67 0.49	0.58	1463.89
	17	30.90 61.22	40.72 33.32	0.66 0.47	0.57	1428.78
	18	30.90 61.22	41.72 34.32	0.66 0.45	0.56	1402.17
	19	30.90 61.22	42.72 35.32	0.67 0.43	0.55	1377.43
	20	30.90 61.22	43.72 36.32	0.67 0.40	0.54	1356.27
E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	0.57 0.67	0.62	1555.27
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	0.56 0.67	0.62	1558.11
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	0.56 0.69	0.62	1572.58
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	0.56 0.70	0.63	1594.35
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	0.57 0.72	0.64	1624.83
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	0.58 0.74	0.66	1657.61
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	0.59 0.75	0.67	1692.79
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	0.60 0.77	0.69	1730.46
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	0.63 0.79	0.71	1785.23
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	0.65 0.81	0.73	1842.33

E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	1.57 2.73	2.15	5419.30
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	1.65 2.92	2.29	5759.75
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	1.73 3.11	2.42	6098.84
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	1.81 3.29	2.55	6418.96
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	1.70 3.41	2.55	6431.94
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	1.99 3.51	2.75	6936.28
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	2.01 3.61	2.81	7083.49
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	2.10 3.68	2.89	7275.32
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	2.16 3.71	2.93	7392.20
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	2.19 3.72	2.95	7440.76
E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	0.58 0.66	0.62	1564.97
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	0.59 0.66	0.63	1583.64
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	0.61 0.67	0.64	1612.12
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	0.63 0.68	0.66	1652.71
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	0.66 0.69	0.68	1702.36
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	0.69 0.71	0.70	1759.89
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	0.72 0.73	0.72	1821.54
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	0.74 0.77	0.76	1905.51
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	0.77 0.76	0.77	1931.71
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	0.79 0.80	0.80	2006.52

E13	51	30.90	14.75	2.73	2.31	5830.06
		58.30	9.44	1.89		
	52	30.90	13.75	2.92	2.42	6089.89
		58.30	8.44	1.91		
	53	30.90	12.75	3.11	2.56	6451.16
		58.30	7.44	2.01		
	54	30.90	11.75	3.29	2.68	6762.76
		58.30	6.44	2.08		
	55	30.90	10.75	3.41	2.76	6948.48
		58.30	5.44	2.11		
	56	30.90	9.75	3.51	2.88	7249.21
		58.30	4.44	2.24		
	57	30.90	8.75	3.61	2.97	7479.17
		58.30	3.44	2.33		
	58	30.90	7.75	3.68	3.05	7694.78
		58.30	2.44	2.43		

FR*: Contenido de fragmentos de roca (gravillas) en cada sitio

FR**: Contenido medio de fragmentos de roca

FR: Contenido de fragmentos de roca en la línea

Nota. Para la proyección se considera que en cada sitio se extrajo un volumen efectivo de 0,2 m x 0,2 m x 0,05 m de FR, y con una cantidad de suelo removido por el cincel de: 0,6 m x 28 m x 0,3 m. Por tanto:

Volumen mincalicata (m³): 0.002

Volumen removido (m³): 5.04

(4) Dureza de las partículas de suelo en cada línea experimental y relación dureza partículas de suelo (Ha) / dureza superficial de la platina (Hm) (ver resultados de dureza de las herramientas en la Tabla 3.11).

Tratamiento	Línea	Coordenadas		Ha* (Mohs)	Ha** (kg/mm ²)	Ha (kg/mm ²)	Hm (kg/mm ²)	Ha / Hm (---)
		X (m)	Y (m)					
E11	1	0.00	20.90	5.24	699.72	700.57	115.00	6.09
		27.69	16.22	5.32	701.42			
	2	27.69	16.22	5.32	701.42	707.10	115.00	6.15
		55.68	11.15	5.89	712.77			
	3	55.68	11.15	5.89	712.77	741.38	115.00	6.45
		79.99	7.70	6.22	770.00			
	4	0.00	22.10	5.28	700.69	700.69	115.00	6.09
		27.69	17.42	5.28	700.69			
	5	27.69	17.42	5.28	700.69	705.26	115.00	6.13
		55.68	12.35	5.74	709.82			
	6	55.68	12.35	5.74	709.82	704.41	115.00	6.13
		4.08	22.74	5.20	699.00			
	7	4.08	22.74	5.20	699.00	699.24	115.00	6.08
		31.95	17.78	5.22	699.48			
	8	31.95	17.78	5.22	699.48	702.70	115.00	6.11
		59.47	13.00	5.55	705.93			
	9	0.00	24.50	5.35	701.91	701.06	115.00	6.10
		27.69	19.82	5.26	700.20			
	10	27.69	19.82	5.26	700.20	702.30	115.00	6.11
		55.68	14.75	5.47	704.40			

E21	11	30.90 61.22	34.72 27.32	5.81 5.50	711.15 704.91	708.03	112.00	6.32
	12	30.90 61.22	35.72 28.32	5.81 5.53	711.15 705.67	708.41	112.00	6.33
	13	30.90 61.22	36.72 29.32	5.81 5.56	711.15 706.18	708.67	112.00	6.33
	14	30.90 61.22	37.72 30.32	5.79 5.57	710.89 706.44	708.66	112.00	6.33
	15	30.90 61.22	38.72 31.32	5.79 5.56	710.89 706.18	708.53	112.00	6.33
	16	30.90 61.22	39.72 32.32	5.78 5.53	710.62 705.67	708.14	112.00	6.32
	17	30.90 61.22	40.72 33.32	5.75 5.51	710.09 705.16	707.62	112.00	6.32
	18	30.90 61.22	41.72 34.32	5.73 5.46	709.56 704.15	706.86	112.00	6.31
	19	30.90 61.22	42.72 35.32	5.71 5.40	709.30 702.90	706.10	112.00	6.30
	20	30.90 61.22	43.72 36.32	5.69 5.33	708.77 701.67	705.22	112.00	6.30
E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	5.70 5.71	709.03 709.30	709.16	115.00	6.17
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	5.62 5.69	707.47 708.77	708.12	115.00	6.16
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	5.52 5.68	705.42 708.51	706.96	115.00	6.15
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	5.42 5.65	703.40 707.99	705.69	115.00	6.14
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	5.32 5.62	701.42 707.47	704.44	115.00	6.13
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	5.21 5.58	699.24 706.69	702.97	115.00	6.11
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	5.11 5.53	697.10 705.67	701.39	115.00	6.10
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	5.01 5.50	695.24 704.91	700.07	115.00	6.09
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	4.94 5.45	675.00 703.90	689.45	115.00	6.00
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	4.89 5.41	650.00 703.15	676.58	115.00	5.88
E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	5.18 5.36	698.52 702.16	700.34	115.00	6.09
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	5.16 5.43	698.28 703.65	700.97	115.00	6.10
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	5.18 5.51	698.52 705.16	701.84	115.00	6.10
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	5.18 5.58	698.52 706.69	702.61	115.00	6.11
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	5.18 5.69	698.52 708.77	703.65	115.00	6.12
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	5.20 5.78	699.00 710.62	704.81	115.00	6.13
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	5.22 5.92	699.48 713.31	706.40	115.00	6.14
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	5.25 6.03	699.96 717.00	708.48	115.00	6.16
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	5.28 6.12	700.69 745.00	722.84	115.00	6.29
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	5.33 6.19	701.67 762.00	731.83	115.00	6.36

E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	5.77 5.73	710.35 709.56	709.96	112.00	6.34
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	5.82 5.75	711.42 710.09	710.75	112.00	6.35
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	5.83 5.78	711.69 710.62	711.15	112.00	6.35
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	5.83 5.79	711.69 710.89	711.29	112.00	6.35
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	5.82 5.79	711.42 710.89	711.15	112.00	6.35
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	5.78 5.81	710.62 711.15	710.89	112.00	6.35
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	5.71 5.81	709.30 711.15	710.22	112.00	6.34
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	5.66 5.81	708.25 711.15	709.70	112.00	6.34
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	5.60 5.81	706.95 711.15	709.05	112.00	6.33
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	5.53 5.77	705.67 710.35	708.01	112.00	6.32
E13	51	30.90 58.30	14.75 9.44	5.36 5.90	702.16 713.04	707.60	116.00	6.10
	52	30.90 58.30	13.75 8.44	5.43 5.97	703.65 714.41	709.03	116.00	6.11
	53	30.90 58.30	12.75 7.44	5.51 6.03	705.16 717.00	711.08	116.00	6.13
	54	30.90 58.30	11.75 6.44	5.58 6.07	706.69 735.00	720.85	116.00	6.21
	55	30.90 58.30	10.75 5.44	5.69 6.10	708.77 740.00	724.39	116.00	6.24
	56	30.90 58.30	9.75 4.44	5.78 6.14	710.62 750.00	730.31	116.00	6.30
	57	30.90 58.30	8.75 3.44	5.92 6.12	713.31 745.00	729.16	116.00	6.29
	58	30.90 58.30	7.75 2.44	6.03 6.12	717.00 745.00	731.00	116.00	6.30

Ha*: Dureza (Mohs) de las partículas de suelo

Ha**: Dureza (kg/mm²) de las partículas de suelo

Ha: dureza media (kg/mm²) de las partículas de suelo en la línea

Hm: dureza superficial (kg/mm²) de las platinas

(5) Contenido de materia orgánica (MO)

Tratamiento	Línea	Coordenadas		MO* (%)	MO ** (%)	MO (m ³)
		X (m)	Y (m)			
E11	1	0.00	20.90	7.80	8.56	0.43
		27.69	16.22	9.32		
	2	27.69	16.22	9.38	9.15	0.46
		55.68	11.15	8.91		
	3	55.68	11.15	8.87	9.19	0.46
		79.99	7.70	9.51		
	4	0.00	22.10	8.35	8.88	0.45
		27.69	17.42	9.41		
	5	27.69	17.42	9.41	9.12	0.46
		55.68	12.35	8.83		
6	55.68	12.35	8.83	8.90	0.45	
	4.08	22.74	8.97			
7	4.08	22.74	8.97	9.15	0.46	
	31.95	17.78	9.33			
8	31.95	17.78	9.63	9.15	0.46	
	59.47	13.00	8.66			
9	0.00	24.50	7.31	8.29	0.42	
	27.69	19.82	9.27			
10	27.69	19.82	9.27	9.33	0.47	
	55.68	14.75	9.39			
E21	11	30.90	34.72	5.43	4.86	0.24
		61.22	27.32	4.28		
	12	30.90	35.72	4.67	5.08	0.26
		61.22	28.32	5.48		
	13	30.90	36.72	4.42	4.84	0.24
		61.22	29.32	5.25		
	14	30.90	37.72	4.39	5.03	0.25
		61.22	30.32	5.67		
	15	30.90	38.72	4.39	5.19	0.26
		61.22	31.32	5.98		
16	30.90	39.72	4.21	4.64	0.23	
	61.22	32.32	5.06			
17	30.90	40.72	3.97	4.27	0.22	
	61.22	33.32	4.57			
18	30.90	41.72	3.96	4.80	0.24	
	61.22	34.32	5.63			
19	30.90	42.72	4.85	4.90	0.25	
	61.22	35.32	4.95			
20	30.90	43.72	4.60	4.49	0.23	
	61.22	36.32	4.38			

E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	3.49 4.55	4.02	0.20
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	3.63 3.86	3.75	0.19
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	3.21 3.49	3.35	0.17
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	3.70 3.82	3.76	0.19
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	3.63 3.87	3.75	0.19
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	3.64 3.85	3.75	0.19
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	3.55 3.74	3.65	0.18
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	3.60 3.79	3.70	0.19
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	3.51 3.68	3.60	0.18
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	3.59 3.61	3.60	0.18
E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	8.51 9.93	9.22	0.46
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	9.54 9.41	9.48	0.48
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	9.82 9.59	9.71	0.49
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	9.80 9.41	9.61	0.48
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	10.43 9.38	9.91	0.50
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	10.36 9.38	9.87	0.50
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	10.50 10.43	10.47	0.53
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	10.25 8.39	9.32	0.47
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	10.02 9.28	9.65	0.49
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	10.05 9.28	9.67	0.49

E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	3.94 4.06	4.00	0.20
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	3.81 4.27	4.04	0.20
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	4.23 4.11	4.17	0.21
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	4.77 4.29	4.53	0.23
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	3.12 4.49	3.81	0.19
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	5.38 4.72	5.05	0.25
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	5.44 4.97	5.21	0.26
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	4.70 5.73	5.22	0.26
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	4.60 5.51	5.06	0.25
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	4.42 5.60	5.01	0.25
E13	51	30.90 58.30	14.75 9.44	9.93 9.12	9.53	0.48
	52	30.90 58.30	13.75 8.44	9.41 9.59	9.50	0.48
	53	30.90 58.30	12.75 7.44	9.37 9.48	9.43	0.48
	54	30.90 58.30	11.75 6.44	9.33 9.55	9.44	0.48
	55	30.90 58.30	10.75 5.44	9.32 9.40	9.36	0.47
	56	30.90 58.30	9.75 4.44	9.32 9.62	9.47	0.48
	57	30.90 58.30	8.75 3.44	9.31 9.47	9.39	0.47
	58	30.90 58.30	7.75 2.44	9.33 9.46	9.40	0.47

MO*: Contenido de materia orgánica

MO**: Contenido medio de materia orgánica en la línea

MO: Contenido de materia orgánica en m³ [volumen influencia: (28 * 0.3 * 0.6)m³]

(6) Morfología (M)

Tratamiento	Línea	Coordenadas		Morfología (adimensional)			
		X (m)	Y (m)	MP*	SPQ*	MP	SPQ
E11	1	0.00	20.90	0.09	0.59	0.09	0.56
		27.69	16.22	0.09	0.52		
	2	27.69	16.22	0.09	0.52	0.09	0.56
		55.68	11.15	0.10	0.59		
	3	55.68	11.15	0.10	0.59	0.10	0.60
		79.99	7.70	0.10	0.60		
	4	0.00	22.10	0.09	0.60	0.09	0.56
		27.69	17.42	0.09	0.52		
	5	27.69	17.42	0.09	0.52	0.09	0.56
		55.68	12.35	0.10	0.59		
6	55.68	12.35	0.10	0.59	0.10	0.60	
	4.08	22.74	0.10	0.60			
7	4.08	22.74	0.10	0.60	0.09	0.57	
	31.95	17.78	0.09	0.54			
8	31.95	17.78	0.09	0.54	0.09	0.57	
	59.47	13.00	0.10	0.59			
9	0.00	24.50	0.09	0.62	0.09	0.57	
	27.69	19.82	0.09	0.52			
10	27.69	19.82	0.09	0.52	0.09	0.56	
	55.68	14.75	0.10	0.59			

E21	11	30.90	34.72	0.09	0.54	0.10	0.57
		61.22	27.32	0.10	0.60		
	12	30.90	35.72	0.09	0.54	0.10	0.57
		61.22	28.32	0.10	0.60		
	13	30.90	36.72	0.09	0.54	0.10	0.57
		61.22	29.32	0.10	0.60		
	14	30.90	37.72	0.09	0.55	0.10	0.57
		61.22	30.32	0.10	0.59		
	15	30.90	38.72	0.09	0.55	0.10	0.57
		61.22	31.32	0.10	0.59		
	16	30.90	39.72	0.09	0.55	0.10	0.57
		61.22	32.32	0.10	0.58		
	17	30.90	40.72	0.09	0.55	0.10	0.56
		61.22	33.32	0.10	0.58		
	18	30.90	41.72	0.09	0.55	0.10	0.56
		61.22	34.32	0.10	0.57		
	19	30.90	42.72	0.09	0.55	0.10	0.56
		61.22	35.32	0.10	0.57		
	20	30.90	43.72	0.09	0.55	0.10	0.56
		61.22	36.32	0.10	0.57		

E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	0.11 0.09	0.56 0.55	0.10	0.55
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	0.10 0.09	0.55 0.55	0.10	0.55
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	0.10 0.09	0.55 0.55	0.10	0.55
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	0.10 0.09	0.55 0.55	0.10	0.55
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	0.10 0.09	0.55 0.55	0.10	0.55
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	0.10 0.09	0.55 0.55	0.10	0.55
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	0.10 0.09	0.55 0.56	0.10	0.55
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	0.10 0.09	0.55 0.56	0.10	0.55
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	0.10 0.09	0.54 0.56	0.09	0.55
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	0.10 0.09	0.54 0.56	0.09	0.55

E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	0.10 0.11	0.59 0.61	0.10	0.60
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	0.10 0.11	0.58 0.61	0.10	0.59
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	0.10 0.11	0.58 0.61	0.10	0.59
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	0.10 0.11	0.57 0.61	0.10	0.59
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	0.10 0.11	0.56 0.60	0.10	0.58
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	0.10 0.11	0.55 0.60	0.10	0.58
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	0.10 0.11	0.55 0.60	0.10	0.57
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	0.10 0.11	0.54 0.60	0.10	0.57
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	0.10 0.11	0.53 0.60	0.10	0.57
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	0.10 0.11	0.53 0.60	0.10	0.56

E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	0.11 0.09	0.56 0.55	0.10	0.55
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	0.10 0.09	0.56 0.55	0.10	0.55
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	0.10 0.09	0.56 0.55	0.10	0.55
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	0.10 0.09	0.56 0.55	0.10	0.55
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	0.10 0.09	0.56 0.55	0.10	0.55
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	0.10 0.09	0.56 0.54	0.10	0.55
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	0.10 0.09	0.56 0.54	0.10	0.55
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	0.10 0.09	0.56 0.54	0.10	0.55
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	0.10 0.09	0.56 0.54	0.10	0.55
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	0.10 0.09	0.56 0.54	0.10	0.55

E13	51	30.90	14.75	0.11	0.61	0.10	0.60
		58.30	9.44	0.10	0.59		
	52	30.90	13.75	0.11	0.61	0.10	0.60
		58.30	8.44	0.10	0.59		
	53	30.90	12.75	0.11	0.61	0.10	0.59
		58.30	7.44	0.10	0.58		
	54	30.90	11.75	0.11	0.61	0.10	0.59
		58.30	6.44	0.10	0.58		
	55	30.90	10.75	0.11	0.60	0.10	0.59
		58.30	5.44	0.10	0.57		
	56	30.90	9.75	0.11	0.60	0.10	0.59
		58.30	4.44	0.10	0.57		
	57	30.90	8.75	0.11	0.60	0.10	0.58
		58.30	3.44	0.10	0.56		
	58	30.90	7.75	0.11	0.60	0.10	0.58
		58.30	2.44	0.10	0.56		

MP*: Morfología al inicio y final de cada línea por método de perímetros

SPQ*: Morfología al inicio y final de cada línea por método Spike Parameter-Quadratic

MP: Monología (promedio) por método de perímetros

SPQ: Monología (promedio) por método Spike Parameter-Quadratic

(7) Consumo de potencia (P)

Tratamiento	Línea	Coordenadas		P* (N m s ⁻¹)	P (N m s ⁻¹)
		X (m)	Y (m)		
E11	1	0.00	20.90	7.80	8.56
		27.69	16.22	9.32	
	2	27.69	16.22	9.38	9.15
		55.68	11.15	8.91	
	3	55.68	11.15	8.87	9.19
		79.99	7.70	9.51	
	4	0.00	22.10	8.35	8.88
		27.69	17.42	9.41	
	5	27.69	17.42	9.41	9.12
		55.68	12.35	8.83	
6	55.68	12.35	8.83	8.90	
	4.08	22.74	8.97		
7	4.08	22.74	8.97	9.15	
	31.95	17.78	9.33		
8	31.95	17.78	9.63	9.15	
	59.47	13.00	8.66		
9	0.00	24.50	7.31	8.29	
	27.69	19.82	9.27		
10	27.69	19.82	9.27	9.33	
	55.68	14.75	9.39		
E21	11	30.90	34.72	5.43	4.86
		61.22	27.32	4.28	
	12	30.90	35.72	4.67	5.08
		61.22	28.32	5.48	
	13	30.90	36.72	4.42	4.84
		61.22	29.32	5.25	
	14	30.90	37.72	4.39	5.03
		61.22	30.32	5.67	
	15	30.90	38.72	4.39	5.19
		61.22	31.32	5.98	
16	30.90	39.72	4.21	4.64	
	61.22	32.32	5.06		
17	30.90	40.72	3.97	4.27	
	61.22	33.32	4.57		
18	30.90	41.72	3.96	4.80	
	61.22	34.32	5.63		
19	30.90	42.72	4.85	4.90	
	61.22	35.32	4.95		
20	30.90	43.72	4.60	4.49	
	61.22	36.32	4.38		

E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	3.49 4.55	4.02
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	3.63 3.86	3.75
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	3.21 3.49	3.35
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	3.70 3.82	3.76
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	3.63 3.87	3.75
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	3.64 3.85	3.75
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	3.55 3.74	3.65
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	3.60 3.79	3.70
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	3.51 3.68	3.60
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	3.59 3.61	3.60
E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	8.51 9.93	9.22
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	9.54 9.41	9.48
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	9.82 9.59	9.71
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	9.80 9.41	9.61
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	10.43 9.38	9.91
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	10.36 9.38	9.87
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	10.50 10.43	10.47
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	10.25 8.39	9.32
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	10.02 9.28	9.65
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	10.05 9.28	9.67

E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	3.94 4.06	4.00
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	3.81 4.27	4.04
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	4.23 4.11	4.17
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	4.77 4.29	4.53
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	3.12 4.49	3.81
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	5.38 4.72	5.05
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	5.44 4.97	5.21
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	4.70 5.73	5.22
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	4.60 5.51	5.06
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	4.42 5.60	5.01
E13	51	30.90 58.30	14.75 9.44	9.93 9.12	9.53
	52	30.90 58.30	13.75 8.44	9.41 9.59	9.50
	53	30.90 58.30	12.75 7.44	9.37 9.48	9.43
	54	30.90 58.30	11.75 6.44	9.33 9.55	9.44
	55	30.90 58.30	10.75 5.44	9.32 9.40	9.36
	56	30.90 58.30	9.75 4.44	9.32 9.62	9.47
	57	30.90 58.30	8.75 3.44	9.31 9.47	9.39
	58	30.90 58.30	7.75 2.44	9.33 9.46	9.40

P*: Consumo de potencia al inicio y final de la línea

P: Consumo de potencia (promedio)

(8) Cantidad de desgaste (Yh)

Tratamiento	Línea	Coordenadas		Y (N s ⁻¹)
		X (m)	Y (m)	
E11	1	0.00	20.90	0.00008
		27.69	16.22	
	2	27.69	16.22	0.00005
		55.68	11.15	
	3	55.68	11.15	0.00005
		79.99	7.70	
	4	0.00	22.10	0.00006
		27.69	17.42	
	5	27.69	17.42	0.00005
		55.68	12.35	
6	55.68	12.35	0.00005	
	4.08	22.74		
7	4.08	22.74	0.00006	
	31.95	17.78		
8	31.95	17.78	0.00006	
	59.47	13.00		
9	0.00	24.50	0.00006	
	27.69	19.82		
10	27.69	19.82	0.00004	
	55.68	14.75		

E21	11	30.90 61.22	34.72 27.32	0.00002
	12	30.90 61.22	35.72 28.32	0.00003
	13	30.90 61.22	36.72 29.32	0.00003
	14	30.90 61.22	37.72 30.32	0.00003
	15	30.90 61.22	38.72 31.32	0.00002
	16	30.90 61.22	39.72 32.32	0.00003
	17	30.90 61.22	40.72 33.32	0.00003
	18	30.90 61.22	41.72 34.32	0.00002
	19	30.90 61.22	42.72 35.32	0.00002
	20	30.90 61.22	43.72 36.32	0.00003
E22	21	4.37 30.90	50.01 42.72	0.00002
	22	4.37 30.90	51.01 43.72	0.00002
	23	4.37 30.90	52.01 44.72	0.00005
	24	4.37 30.90	53.01 45.72	0.00002
	25	4.37 30.90	54.01 46.72	0.00003
	26	4.37 30.90	55.01 47.72	0.00003
	27	4.37 30.90	56.01 48.72	0.00003
	28	4.37 30.90	57.01 49.72	0.00003
	29	4.37 30.90	58.01 50.72	0.00003
	30	4.37 30.90	59.01 51.72	0.00003

E12	31	3.00 30.90	20.00 14.75	0.00015
	32	3.00 30.90	19.00 13.75	0.00012
	33	3.00 30.90	18.00 12.75	0.00006
	34	3.00 30.90	17.00 11.75	0.00012
	35	3.00 30.90	16.00 10.75	0.00007
	36	3.00 30.90	15.00 9.75	0.00009
	37	3.00 30.90	14.00 8.75	0.00007
	38	3.00 30.90	13.00 7.75	0.00012
	39	3.00 30.90	12.00 6.75	0.00012
	40	3.00 30.90	11.00 5.75	0.00014
E23	41	4.37 30.90	49.01 41.72	0.00006
	42	4.37 30.90	48.01 40.72	0.00006
	43	4.37 30.90	47.01 39.72	0.00006
	44	4.37 30.90	46.01 38.72	0.00005
	45	4.37 30.90	45.01 37.72	0.00007
	46	4.37 30.90	44.01 36.72	0.00003
	47	4.37 30.90	43.01 35.72	0.00007
	48	4.37 30.90	42.01 34.72	0.00004
	49	4.37 30.90	41.01 33.72	0.00005
	50	4.37 30.90	40.01 32.72	0.00006

E13	51	30.90 58.30	14.75 9.44	0.00022
	52	30.90 58.30	13.75 8.44	0.00019
	53	30.90 58.30	12.75 7.44	0.00032
	54	30.90 58.30	11.75 6.44	0.00027
	55	30.90 58.30	10.75 5.44	0.00034
	56	30.90 58.30	9.75 4.44	0.00029
	57	30.90 58.30	8.75 3.44	0.00034
	58	30.90 58.30	7.75 2.44	0.00042

Y: pérdida de peso por unidad de tiempo en la línea (x,y)

F. Anexo: propiedades del suelo no incluidas en el modelo de abrasividad de suelos agrícolas (medidas en el lote experimental).

(1) Humedad gravimétrica (W) y Densidad aparente (Da) inicial del lote No. 8 de Cotové (abril de 2008)

Coordenadas		Humedad gravimétrica Wg (%)	Densidad aparente D (Mg.m ⁻³)
X (m)	Y (m)		
0	0	22.75	1.25
10	0	21.12	1.23
24	0	19.14	1.41
38	0	17.19	1.35
52	0	18.37	1.40
66	0	17.79	1.48
80	0	25.37	1.35
0	10	17.65	1.35
10	10	17.58	1.24
24	10	23.71	1.44
38	10	17.59	1.33
52	10	16.67	1.25
66	10	25.34	1.28
80	10	26.53	1.40
0	20	52.53	1.45
10	20	18.66	1.54
24	20	0.79	1.84
38	20	20.53	1.45
52	20	17.37	1.38
66	20	32.87	1.22
74	20	26.82	1.30

0	30	88.50	1.44
10	30	19.42	1.53
24	30	18.53	1.56
38	30	24.78	1.19
52	30	26.61	1.38
66	30	25.04	1.28
0	40	20.91	1.59
10	40	20.04	1.53
24	40	19.93	1.47
38	40	56.32	1.49
52	40	20.98	1.44
61	40	20.96	1.54
0	49	19.78	1.47
10	49	23.89	1.34
24	49	26.54	1.35
38	49	20.56	1.55
52	49	17.72	1.65
0	60	32.06	1.44
10	60	21.46	1.44
24	60	22.91	1.31
38	60	26.47	1.40
48	60	31.76	0.96
0	70	20.68	1.42
10	70	23.14	1.37
24	70	21.52	1.35
38	70	21.69	1.55
0	80	22.01	1.53
10	80	21.62	1.39
24	80	21.69	1.40
34	80	27.40	1.30
0	90	22.95	1.36
10	90	25.16	1.43
24	88	24.00	1.38
0	98	25.66	1.26
10	98	24.89	1.49
25	93.8	20.87	1.54

Media	24.30	1.40
Desviación est	11.54	0.13

Estadísticos básicos

Densidad aparente (Da)

Propiedades	Estadísticos (valor de Da en Mg m ³)										
	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p	n
Da	1,4	0,1	9,5	1,0	1,8	1,3	1,5	-0,1	4,0	0,498	57

Q1: Cuartil inferior; Q2: Cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación; S: sesgo; K: kurtosis; n: No. de datos.

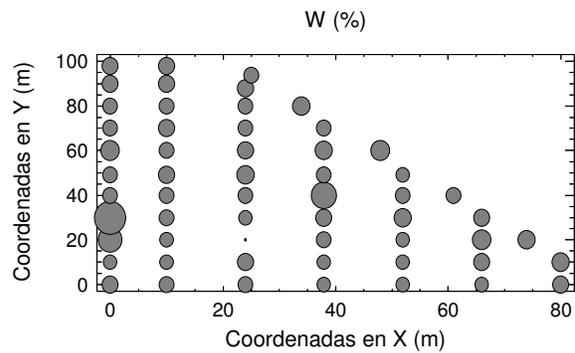
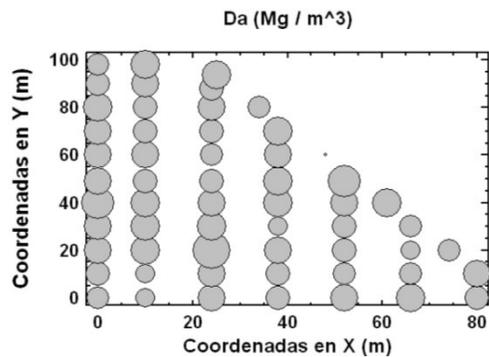
Si Valor p > 0.05 de Shapiro-Wilk, se considera que la distribución de datos de la variable es normal.

Humedad gravimétrica (W)

Propiedades	Estadísticos (valor de W en %)										
	Media	Desv. Est.	C.V (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q2	S	K	Valor p	n
W	24.3	11.5	47.5	0.8	88.5	19.8	25.3	11.3	28.0	0.000	57

Q1: Cuartil inferior; Q2: Cuartil superior; C.V (%): coeficiente de variación; S: sesgo; K: kurtosis; n: No. de datos.

Si Valor p > 0.05 de Shapiro-Wilk, se considera que la distribución de datos de la variable es normal.



Gráficos de burbujas de la distribución espacial relativa de los valores de Densidad aparente y humedad gravimétrica del suelo de Cotové. a) Da (densidad aparente, Mg m⁻³). b) W (humedad gravimétrica, %)

(2) Humedad: higroscópica, a capacidad de campo y en el límite de soltura

Georreferenciación		Medidas de humedad del suelo		
X (m)	Y (m)	Higroscopica HSA (%)	Capacidad Campo C.C (%)	Limite de soltura L.S (%)
0	0	6.95	30.81	22.37
10	0	6.33	29.48	23.36
24	0	6.13	27.82	22.92
38	0	6.32	28.14	19.78
52	0	6.47	27.41	21.05
66	0	6.13	27.82	18.52
80	0	5.33	30.70	21.08
0	10	6.69	28.71	23.40
10	10	5.91	28.24	18.97
24	10	6.37	27.52	22.92
38	10	6.17	26.82	18.15
52	10	5.63	27.92	19.50
66	10	5.63	26.50	21.65
80	10	6.02	28.29	20.16
0	20	6.29	28.03	22.51
10	20	5.57	29.24	22.22
24	20	5.86	29.86	17.26
38	20	6.80	28.86	25.90
52	20	6.29	27.58	19.18
66	20	6.12	27.84	18.52
74	20	6.29	26.62	19.66
0	30	6.39	30.05	19.26
10	30	6.34	27.21	21.43
24	30	6.54	26.99	23.05
38	30	6.26	28.75	23.05
52	30	6.88	33.25	25.49
66	30	5.89	27.38	24.76
0	40	6.34	27.59	20.59
10	40	6.17	30.29	21.82
24	40	7.15	27.14	25.85
38	40	6.06	27.77	21.74
52	40	5.74	27.86	25.52
61	40	5.54	24.72	21.93
0	49	6.41	29.10	24.81
10	49	5.84	25.57	15.22
24	49	6.34	27.44	19.55
38	49	5.88	28.23	23.91
52	49	5.27	26.51	21.45
0	60	5.67	30.19	20.61
10	60	6.42	24.76	22.41
24	60	6.10	28.40	21.67
38	60	6.09	27.20	22.61
48	60	6.01	25.97	19.20
0	70	6.96	27.19	21.45
10	70	6.48	28.76	17.17
24	70	6.26	30.04	22.22
38	70	6.05	30.23	22.33
0	80	5.91	28.42	19.19
10	80	6.31	29.88	22.45
24	80	6.74	29.79	24.39
34	80	6.04	28.36	19.47
0	90	6.77	27.60	24.50
10	90	7.11	32.42	18.02
24	88	7.24	28.96	16.04
0	98	6.25	26.00	24.24
10	98	6.69	29.31	20.00
25	93.8	6.53	30.15	19.37
Media		6.25	28.31	21.33
Desviación estándar		0.44	1.66	2.49

(3) Cohesión y ángulo de fricción interna de suelos del lote No. 8 del Centro agropecuario Cotové

Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia y pavimentos -Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín (norma de corte directo U. U. ASTM D3080-04). Se tomaron dos muestras en los dos tipos de suelo del lote No.8 de Cotové. Las coordenadas de medición fueron (de acuerdo a la Figura 2.2):

Código de muestra	Coordenada x (m)	Coordenada y (m)	Tipo de suelo	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción f
M1	10	5	Suelo 1 (franco arcilloso)	30	15°
M2	62	33	Suelo 2 (franco limoso)	20	24°

(4) Resistencia a la penetración

En cada sitio de la minicalcata se hicieron tres mediciones utilizando el penetrómetro de cono marca Royal Gauge (diámetro de la base del cono de 20 mm) donde la medición correspondió a una profundidad de 200 mm a partir de la superficie del suelo).

x (m)	y (m)	Resistencia penetración (psi)
0	0	145
10	0	138
24	0	150
38	0	150
52	0	150
66	0	150
80	0	98
0	10	150
10	10	150
24	10	145
38	10	150
52	10	95
66	10	81
80	10	78
0	20	143
10	20	145
24	20	150
38	20	150

52	20	143
66	20	98
74	20	86
0	30	150
10	30	146
24	30	111
38	30	98
52	30	95
66	30	148
0	40	148
10	40	150
24	40	148
38	40	149
52	40	150
61	40	148
0	49	141
10	49	96
24	49	70
38	49	148
52	49	150
0	60	150
10	60	150
24	60	148
38	60	103
48	60	148
0	70	138
10	70	118
24	70	150
38	70	143
0	80	133
10	80	140
24	80	150
34	80	86
0	90	148
10	90	145
24	88	150
0	98	115
10	98	143
25	93,8	133

133,02

G. Anexo: Granulometría en porcentaje del suelo del lote experimental de Cotové (abril 2008).

Tierra fina (T) y fragmentos de roca (FR)

Coordenadas		Granulometría												
X (m)	Y (m)	Arcillas (%)	Limos (%)	Arenas fraccionadas (%)					Arenas total (%)	Gravillas fraccionadas (%)			Gravillas total (%)	Gravas (%)
				Muy fina	Fina	Media	Gruesa	Muy Gruesa		Fina	Media	Gruesa		
0	0	22.32	22.33	2.51	3.28	2.85	3.57	1.49	13.70	1.01	1.29	4.17	6.47	35.19
10	0	26.90	29.14	2.86	4.03	4.08	6.56	2.70	20.23	1.95	2.95	2.75	7.66	16.08
24	0	32.50	30.03	3.63	4.66	4.68	10.86	5.07	28.90	3.61	4.55	0.41	8.57	0.00
38	0	28.41	28.41	5.51	5.46	5.59	10.12	4.05	30.73	4.95	2.70	4.81	12.46	0.00
52	0	27.91	25.77	3.82	4.63	4.50	8.16	3.82	24.92	3.03	1.84	5.21	10.09	11.32
66	0	30.98	30.98	3.20	4.43	5.53	10.57	4.08	27.81	3.26	3.24	3.72	10.22	0.00
80	0	34.84	29.69	3.71	4.85	6.83	11.72	2.42	29.53	4.31	1.34	0.29	5.93	0.00
0	10	32.40	29.92	3.74	4.21	4.69	10.97	5.56	29.17	3.62	3.91	0.97	8.50	0.00
10	10	24.45	28.71	2.79	3.63	3.97	7.96	3.64	21.98	5.51	6.51	12.84	24.86	0.00
24	10	28.63	28.65	3.10	4.39	5.26	9.49	3.41	25.65	4.09	3.29	6.27	13.65	3.42
38	10	27.86	25.72	3.25	2.96	4.46	13.17	4.09	27.93	4.44	3.02	11.03	18.49	0.00
52	10	26.34	33.53	4.61	4.42	4.07	10.72	3.40	27.22	4.41	3.09	5.41	12.91	0.00
66	10	30.98	30.98	3.61	4.94	7.29	14.94	3.66	34.44	2.83	0.30	0.48	3.61	0.00
80	10	33.24	33.24	5.02	4.21	5.59	11.92	2.03	28.78	2.61	1.01	1.12	4.75	0.00
0	20	31.82	34.47	3.72	4.62	6.12	10.22	3.46	28.14	3.63	1.30	0.65	5.58	0.00
10	20	37.06	34.22	4.07	5.10	5.12	6.84	2.60	23.73	2.05	1.26	1.68	4.99	0.00
24	20	31.56	31.59	3.42	5.74	4.44	11.44	3.42	28.45	2.21	0.81	5.38	8.39	0.00
38	20	39.85	33.94	4.41	5.07	5.54	5.66	1.48	22.16	0.82	1.17	2.06	4.05	0.00
52	20	37.91	35.00	3.73	4.36	4.91	6.90	2.28	22.18	1.29	2.70	0.93	4.92	0.00
66	20	23.66	25.63	3.62	3.88	3.72	10.63	2.78	24.63	1.42	0.18	0.00	1.60	24.48
74	20	35.68	35.68	3.47	4.03	4.92	10.88	2.60	25.90	2.38	0.37	0.00	2.74	0.00

0	30	37.17	37.17	4.38	5.45	4.23	7.11	2.45	23.61	1.04	1.01	0.00	2.05	0.00
10	30	30.93	30.95	6.67	5.91	6.33	9.86	4.27	33.03	3.42	0.38	1.29	5.09	0.00
24	30	35.45	38.42	5.93	5.79	5.40	6.34	1.05	24.50	1.27	0.36	0.00	1.63	0.00
38	30	31.27	31.29	5.58	5.22	5.28	9.64	2.61	28.33	2.40	4.87	1.84	9.11	0.00
52	30	37.90	34.99	5.26	3.97	3.25	9.45	3.46	25.39	1.62	0.10	0.00	1.72	0.00
66	30	35.68	35.69	4.92	5.39	4.96	7.93	1.88	25.07	2.35	0.58	0.63	3.56	0.00
0	40	8.39	61.56	4.16	4.76	4.32	4.91	1.71	19.85	2.12	1.15	6.93	10.19	0.00
10	40	38.14	38.15	5.38	5.36	4.44	5.45	1.38	22.01	1.11	0.58	0.00	1.70	0.00
24	40	12.05	63.24	5.49	5.12	4.38	7.55	1.22	23.76	0.35	0.19	0.42	0.96	0.00
38	40	34.04	36.89	6.10	7.03	4.94	6.12	1.65	25.83	1.51	1.14	0.58	3.23	0.00
52	40	7.18	64.66	7.45	7.38	4.87	4.49	1.18	25.37	1.21	1.31	0.25	2.78	0.00
61	40	5.74	65.96	10.34	9.30	5.13	2.88	0.24	27.89	0.19	0.21	0.00	0.41	0.00
0	49	10.21	62.74	6.88	7.27	4.68	5.21	1.50	25.55	1.30	0.21	0.00	1.51	0.00
10	49	31.65	37.15	7.25	7.71	6.09	6.78	1.08	28.91	2.02	0.27	0.00	2.29	0.00
24	49	33.82	39.70	5.34	6.16	4.96	6.80	0.85	24.10	1.45	0.93	0.00	2.38	0.00
38	49	32.65	37.47	6.33	6.60	4.69	6.55	2.03	26.20	2.31	0.80	0.56	3.67	0.00
52	49	29.45	37.48	7.86	7.06	4.62	5.70	1.64	26.88	2.20	2.03	1.97	6.19	0.00
0	60	36.77	36.77	5.98	6.12	4.94	5.92	1.58	24.55	1.10	0.21	0.60	1.91	0.00
10	60	34.75	34.77	6.35	6.75	5.10	6.73	2.72	27.64	2.24	0.60	0.00	2.84	0.00
24	60	36.21	33.42	6.51	7.10	5.94	5.01	2.15	26.71	0.87	2.80	0.00	3.67	0.00
38	60	33.08	42.10	4.25	4.49	3.28	7.44	2.27	21.73	1.56	0.82	0.70	3.08	0.00
48	60	13.99	15.16	4.35	3.45	3.29	4.80	1.61	17.50	5.38	22.75	18.40	46.53	6.81
0	70	32.08	34.75	4.53	5.38	4.79	10.73	3.22	28.65	1.53	1.58	1.40	4.51	0.00
10	70	34.83	34.85	5.05	4.99	5.43	8.83	2.79	27.09	1.76	1.09	0.37	3.22	0.00
24	70	30.41	32.95	5.80	6.86	5.56	9.22	3.42	30.86	2.40	2.04	1.34	5.78	0.00
38	70	8.37	61.41	5.93	5.18	5.93	8.03	1.35	26.42	1.17	0.91	1.72	3.79	0.00
0	80	28.53	30.91	3.85	3.75	4.29	14.59	4.53	31.02	4.04	3.52	1.98	9.54	0.00
10	80	29.18	31.61	3.67	4.24	5.18	12.64	5.10	30.84	3.12	2.99	2.27	8.38	0.00
24	80	34.44	34.44	4.24	3.99	3.99	13.85	2.97	29.02	0.95	0.74	0.41	2.10	0.00
34	80	35.45	35.45	3.60	3.80	3.67	13.99	2.90	27.95	0.30	0.85	0.00	1.14	0.00
0	90	32.19	32.19	3.80	4.63	4.09	7.79	3.41	23.72	6.66	4.72	0.52	11.89	0.00
10	90	32.40	35.10	3.96	3.49	2.62	14.09	5.75	29.91	1.97	0.61	0.00	2.58	0.00
24	88	36.57	36.57	3.74	4.07	5.00	11.23	2.03	26.07	0.43	0.35	0.00	0.78	0.00
0	98	6.99	62.91	4.23	5.12	5.75	9.20	1.59	25.89	2.78	0.91	0.52	4.21	0.00
10	98	38.46	38.46	3.45	4.30	4.02	8.04	1.95	21.78	0.85	0.47	0.00	1.31	0.00
25	93.8	9.97	61.22	4.07	5.84	6.47	8.52	2.25	27.15	1.40	0.26	0.00	1.67	0.00
Media		28.80	37.13	4.75	5.12	4.84	8.71	2.66	26.09	2.31	1.95	2.02	6.28	1.71
Desviación est		9.38	11.44	1.48	1.28	0.95	2.93	1.23	3.68	1.43	3.15	3.45	7.15	6.15

H. Anexo: dureza superficial de las herramientas en escala Rockwell B.

Platina	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 4	Dureza 5	Dureza 6	Dureza promedio	Desvesta
1	62	59	59	61	61	60	60.3	1.21106
2	65	66	65	66	64	64	65.0	0.89443
3	65	64	65	64	65	65	64.7	0.51640
4	71	66	67	74	70	71	69.8	2.92689
5	68	68	66	69	67	69	67.8	1.16905
6	62	62	62	62	61	62	61.8	0.40825
7	67	64	65	66	65	63	65.0	1.41421
8	61	62	61	62	63	63	62.0	0.89443
9	65	65	64	67	64	66	65.2	1.16905
10	66	67	66	67	67	68	66.8	0.75277
11	67	68	70	70	66	65	67.7	2.06559
12	62	62	61	61	62	61	61.5	0.54772

I. Anexo: justificación sobre el uso de platinas durante los experimentos de campo

Se tomó la decisión de utilizar las platinas en vez de las puntas de cincel originales, por la longitud restringida de las líneas experimentales (28 m c/u), en las cuales, serían muy bajos los valores de pérdida de peso. Lo anterior se determinó con base en ensayos preliminares en Cotové, donde se registró pérdidas de peso de 0,0025 a 0,0041 g/m, con humedad gravimétrica promedio del suelo de 20,52 %. Se consideró que para un suelo con bajo contenido de FR y con humedad del suelo superior al 30%, se podrían obtener registros poco significativos de pérdida de peso. Cabe también anotar que la metodología de utilización de platinas de desgaste, ha sido utilizada por autores como Natsis *et al.* (2008) que cuantificó desgaste en arados de vertedera, instalando series de platinas sobre cuchillas de corte; Richardson (1967), también empleó la técnica de platinas en sus experimentos de campo.

J. Anexo: artículo sobre variabilidad espacial de propiedades físico – mecánicas de suelos, desarrollado durante la ejecución de la tesis.

Jaramillo, D. F., H. González y F. Álvarez. 2008. “Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada”. Artículo publicado en Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, vol 3, N° 2 pp: 10-19.

VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE SUELOS DE TEXTURA PESADA

Daniel Jaramillo J.¹; Hugo González S.²; Fernando Álvarez M.³

Resumen.

Se estudió el comportamiento espacial de la resistencia a la penetración (RP), densidad aparente (Da), coeficiente higroscópico (CH), contenido de fragmentos de roca (FR) y contenido de materia orgánica (MOS) en suelos de textura pesada de clima cálido seco del Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ubicado en el municipio de Santafé de Antioquia. El uso histórico de los suelos estudiados se caracteriza por la utilización repetida de labranza convencional por más de 30 años. Se realizó un muestreo sistemático en red con una distancia aproximada, entre sitios, de 14 m con dirección próxima al norte y de 10 m con dirección próxima al occidente, con el cual se obtuvieron 57 sitios de muestreo en un área efectiva de 0,6 ha. Las muestras se tomaron entre 150 mm y 200 mm de profundidad, rango promedio de trabajo de la mayoría de herramientas agrícolas de labranza. Los valores promedios de RP, Da, CH, FR y MOS fueron 133,02 psi, 1,41 Mg m⁻³, 6,25 %, 7,45 % y 6,14 % y los coeficientes de variación de las mismas variables fueron de 18,12 %, 9,46 %, 7,04 %, 128,02 % y 44,68 %, respectivamente. Las variables RP, Da, CH y FR presentaron variabilidad espacial entre alta y media (nugget/sill < 50 %), con rangos de 14,6 m, 25,5 m, 16,2 m y 38,0 m para RP, Da, CH y FR, respectivamente, mientras que en MOS no hubo dependencia espacial.

¹ Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias. Grupo de Variabilidad espacial de suelos. E-mail: djaramal@unalmed.edu.co.

² Profesor Asistente de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Grupo de Ingeniería Agrícola. E-mail: hagonzal@unal.edu.co).

³ Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Grupo de Ingeniería Agrícola. E-mail: falvarez@unalmed.edu.co).

Palabras Claves: Variabilidad espacial de suelos, Geoestadística, Propiedades físicas y mecánicas de suelos, Suelos agrícolas, Labranza.

Abstract.

The variation of penetration resistance (RP), bulk density (Da), hygroscopic coefficient (CH), content of rock fragments (FR) and organic matter content (MO) was studied in a heavy-texture, dry warm weather soil at the Cotové agricultural center located in Santafé de Antioquia, This soil has been used for traditional tillage for over 30 years. A sampling grid was defined with an approximate distance between sampling points of 14 m in North-South direction and 10 m in West-East direction, which led to an effective area of 0,6 ha and 57 different measurements. The soil samples were taken at a depth that varied between 150 and 200 mm, which is the average working range of most arable farming tools. The mean values of RP, Da, CH, FR and MOS were 133,02 psi, 1,41 Mg m⁻³, 6,25%, 7,45 % and 6,14% with coefficients of variation of 18,12%, 9,46%, 7,04%, 128,02 % and 44,68%, respectively. The variables RP, Da, CH and FR showed spatial variability between high and medium (nugget / sill <50%), with ranges of 14,6 m, 25,5 m, 16,2 m, 38,0 m to RP, Da, CH and FR respectively, while MOS did not show spatial dependence.

Key words: Spatial variability of soils, Geostatistic, Physical and mechanical properties of the soil, Agricultural soils, Tillage.

1. Introducción

De acuerdo con Amézquita y Rubiano (2001) citados por Arango ⁽¹⁾, el análisis de la variabilidad espacial de las características de un campo, es uno de los pilares en los que se fundamenta la agricultura de precisión.

Los suelos más evolucionados presentan menor variabilidad que aquellos menos evolucionados. La identificación de la variabilidad espacial del suelo ayuda a mejorar el muestreo, el diseño de experimentos y la interpretación de los resultados y abre posibilidad de manejar más eficientemente los recursos de producción, con menor riesgo de deterioro ambiental ⁽⁶⁾.

Una característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse como homogéneas. Esta heterogeneidad induce una variabilidad en sus propiedades que puede llegar a ser de considerable magnitud y que puede afectar grandemente las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas.

La variabilidad es una condición inherente a los suelos y su origen está influenciado tanto por condiciones naturales (variados factores y procesos pedogenéticos), como por condiciones inducidas por el uso y el manejo de los mismos.

La variabilidad del suelo depende, aparte del tipo de suelo, de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando ha estado sometido a uso. Aquellas propiedades que más se alteran por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad ⁽¹¹⁾.

Upchurch y Edmonds ⁽¹⁶⁾ señalan que cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, se define como **variabilidad aleatoria o debida al azar**, mientras que si la variabilidad puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles, se denomina **variabilidad sistemática**. La variabilidad sistemática tiene dos componentes: uno de tendencia relacionada con la localización de las muestras y que puede llamarse **tendencia espacial (T)** y otro de **dependencia espacial (DE)**.

La dependencia espacial se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo del espaciamiento entre las muestras o de la distancia y la

dirección en que ellas sean recolectadas; las variables que tienen este comportamiento son llamadas **variables regionalizadas**. Para estudiar variables que presentan dependencia espacial se tiene un conjunto de procedimientos estadísticos que se conoce como **Geoestadística**. La herramienta fundamental de la geoestadística es el **semivariograma**, el cual es una gráfica que relaciona la semivarianza de los pares de puntos de muestreo que están separados una determinada distancia, con los incrementos en la distancia de separación entre ellos. Si la variable que se estudia presenta dependencia espacial, la semivarianza irá aumentando su valor al irse incrementando la distancia de separación entre los puntos de muestreo hasta llegar, idealmente, a un valor constante de la semivarianza a partir de una determinada distancia.

La semivarianza describe el componente dependiente espacialmente de una función aleatoria y al comparar dos sitios dentro de la zona de estudio, ella depende sólo de la distancia o de la distancia y la dirección de separación entre los dos sitios y no de su localización geográfica ⁽¹⁵⁾.

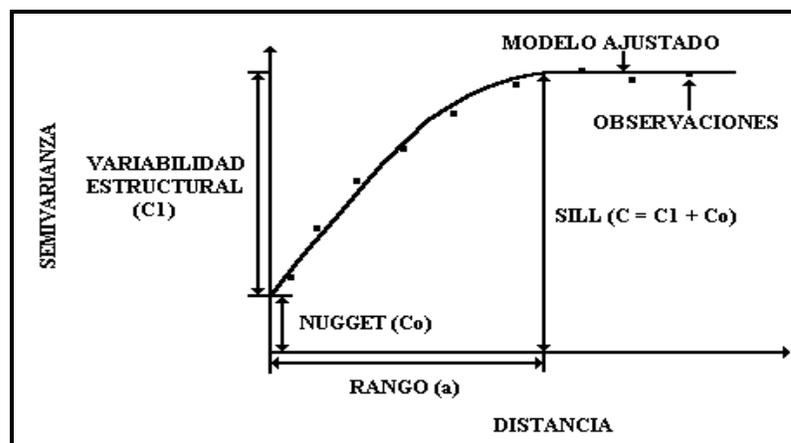
Según Trangmar *et al.* ⁽¹⁵⁾, la semivarianza, en un intervalo de distancia dado o **lag**, se estima como el promedio de las diferencias al cuadrado entre todas las observaciones que están separadas por ese lag. Para hacer dicha estimación se utiliza la siguiente ecuación:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (1)$$

Donde: $\hat{\gamma}(h)$ es la semivarianza
 N es el número de pares de puntos separados por una determinada distancia h
 $z(x_i)$ es el valor de la variable en una localidad
 $z(x_{i+h})$ es el valor que toma la variable en otra localidad ubicada a una distancia h de x

Cuando se relacionan gráficamente los valores de **semivarianza** contra los intervalos lag establecidos se tiene el producto fundamental del análisis geoestadístico que es el **semivariograma** (ver Figura 1).

Figura 1. El semivariograma y sus componentes ⁽⁵⁾.



El conjunto de observaciones ubicadas en la gráfica conforma lo que se llama el **semivariograma experimental** y éste se ajusta a un modelo teórico para poder hacer predicciones sobre el comportamiento espacial de la variable. En los semivariogramas **transicionales**, es decir, aquellos en los cuales la semivarianza aumenta al aumentar la distancia hasta un cierto punto en el cual se torna constante, la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza es llamada **rango (a)**

y define la distancia hasta la cual hay dependencia espacial en las muestras: muestras tomadas a una distancia mayor que el rango son independientes. En los semivariogramas **no transicionales** no puede definirse un rango ya que éste, si existe, está por fuera de la máxima longitud utilizada para el análisis.

El **sill (C)** es el valor de la semivarianza al cual el modelo se estabiliza y está compuesto por la suma de la **semivarianza estructural (C1)** y la semivarianza aleatoria o **nugget (Co)**; adquiere un valor muy cercano al valor de la varianza total de la variable, cuando se cumple la estacionaridad en los datos.

El grado de dependencia espacial de las propiedades del suelo es muy variable. Si se establece el porcentaje que le corresponde a la variabilidad aleatoria (nugget) de una propiedad, dentro de la variabilidad total (sill) que ella presenta, puede estimarse el grado de dependencia espacial que tiene. Cambardella *et al.* ⁽²⁾ establecieron 3 categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de las variables, de acuerdo con dichos porcentajes, así:

- Fuerte dependencia espacial: nugget < 25%.
- Moderada dependencia espacial: nugget entre 25 y 75%.
- Débil dependencia espacial: nugget > 75%.

El conocimiento de la variabilidad espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere de él cuando se establece, tiene varias aplicaciones prácticas como:

- Elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.
- Hacer control de calidad de mapas de suelos.
- Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales en el campo.
- Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.
- Mejorar la interpretación de resultados de investigación.
- Ayudar en el manejo intensivo y ambientalmente amigable de los suelos.

González ⁽⁴⁾ estudió el efecto de la mecanización, con labranza convencional, sobre la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas de un Haplustoll del abanico de Ibagué en varias profundidades y encontró dependencia espacial en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración. Los rangos encontrados para el horizonte superficial (0 a 16 cm) y para el subsuperficial (16 a 30 cm) fueron de 30 m y de 42 m en la densidad aparente y de 33 m y 34,5 m en la resistencia a la penetración, respectivamente.

Rivera y Madero ⁽¹³⁾ encontraron dependencia espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol (Typic Haplustert) del municipio de Candelaria, Valle del Cauca, entre 15 y 25 cm de profundidad, con un rango de 24,5 m.

Lozano *et al.* ⁽⁸⁾ detectaron alta dependencia espacial (relación C/Sill > 65 %) en la resistencia a la penetración, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica y el contenido de agua fácilmente aprovechable en Vertisoles, Alfisoles y Mollisoles del Valle del Cauca, tanto en la parte superficial como en la subsuperficial del suelo, con rangos que variaron entre 267 y 528 m en superficie y entre 109 y 4110 m, en profundidad. Observaron, además, que el comportamiento espacial de la resistencia a la penetración, la densidad aparente y el contenido de humedad fácilmente aprovechable fue más uniforme en profundidad que en superficie, mientras que el de la materia orgánica se comportó de manera contraria, todo esto posiblemente relacionado con el uso intensivo del suelo.

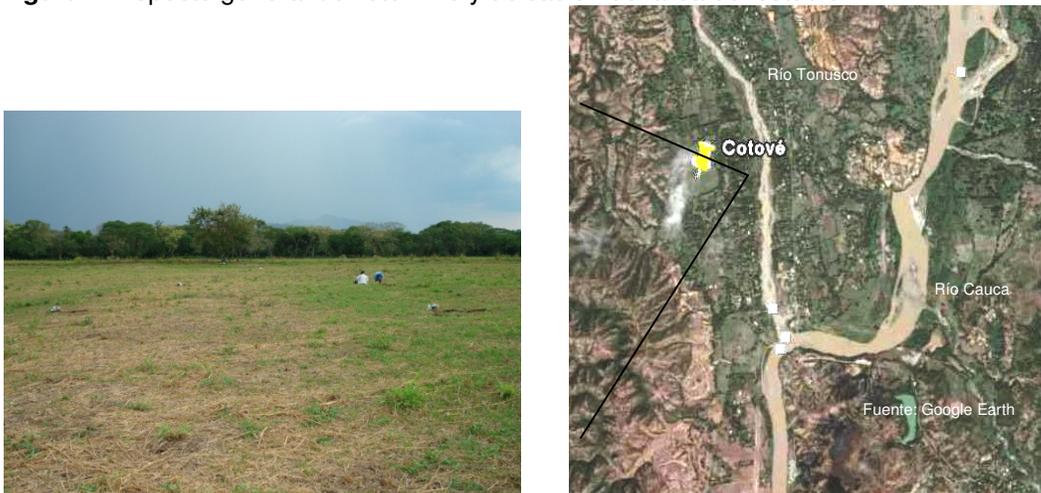
Arango ⁽¹⁾, en un lote cercano al sitio de este trabajo, en un Alfisol, encontró dependencia espacial media a alta en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración, con rangos de 14,85 m y 17,76 m, respectivamente y no encontró variabilidad espacial en el contenido de materia orgánica.

Con éste trabajo se estudió la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas de suelos pesados de clima cálido seco, con el fin de poder proyectar alternativas para su mecanización y con la posibilidad de reducir el riesgo de compactación en el mismo, empleando los principios de la agricultura de precisión.

2. Materiales y procedimientos

Este trabajo se realizó en el lote N° 8 del Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ubicado en la vereda El Espinal del municipio de Santafé de Antioquia. El uso histórico de los suelos estudiados se caracteriza por la utilización agrícola intensiva con labranza convencional (con considerable utilización de arados y rastras de discos), por más de 30 años (Figura 2).

Figura 2. Aspecto general del lote N° 8 y ubicación del área del estudio.

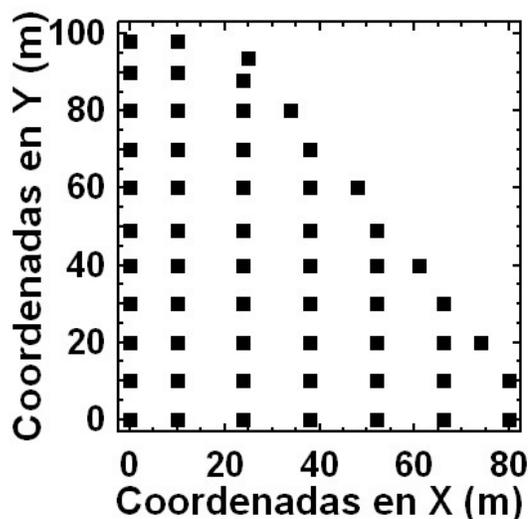


El Centro Agropecuario se encuentra a 565 m.s.n.m y presenta clima cálido seco (bs-T) caracterizado por valores medios de 27,3 °C de temperatura, 1919,6 mm de precipitación total anual y 1611 mm de evapotranspiración total anual. El mes más lluvioso es octubre y el más seco es enero. Se presenta un déficit total de agua promedio anual de 591,4 mm ⁽¹⁾. El lote seleccionado se ubica en una terraza aluvial plana (pendiente < 3%) y los suelos dominantes en él son de textura media a pesada, moderadamente profundos y con buen nivel de fertilidad.

En el lote seleccionado se estableció una cuadrícula de aproximadamente 6000 m² (Figura 3), con tamaño de celda de 14 m x 10 m. Con este diseño se obtuvo una malla con 57 intersecciones que se materializaron en el terreno con estacas y que se georreferenciaron con un sistema de coordenadas planas (X, Y) de origen arbitrario. Cada intercepto definió un punto de referencia para el muestreo a realizar.

Una vez materializada la malla de muestreo, en cada sitio se hizo una minicalicata de 30x30x15 cm, en la cual se tomaron las muestras de suelo entre 15 y 20 cm de profundidad. Antes de tomar las muestras de suelo, se hizo la determinación de la resistencia a la penetración (RP), en psi, utilizando un penetrómetro de cono Royal Gauge con cono de 2 mm, medidor de reloj y resolución de 4 psi; en cada una de las esquinas de la minicalicata se hizo una lectura con el penetrómetro a 15 cm de profundidad (4 en total por cada sitio) y se estableció el promedio de ellas para caracterizar la RP del sitio.

Figura 3. Esquema de muestreo utilizado.



Después de medir la resistencia a la penetración, se procedió a tomar una muestra de suelo sin disturbar, con un cilindro metálico biselado de $96,21 \text{ cm}^3$ de volumen, para determinar la densidad aparente de la tierra fina, excluyendo los fragmentos de roca (Da, en Mg m^{-3}) y luego se colectó una muestra disturbada de suelo de aproximadamente 2500 g para determinar el contenido de fragmentos de roca (FR: partículas minerales con diámetro mayor a 2 mm, en %), el coeficiente higroscópico (CH: contenido de humedad gravimétrica del suelo seco al aire, en %) y el contenido de materia orgánica (MOS, por el método de Walkley y Black, en %). Todos los análisis se hicieron con muestras secadas al aire y, exceptuando los FR, en muestras tamizadas a 2 mm. Los métodos utilizados para hacer las determinaciones planteadas se encuentran descritos en Motta *et al.*⁽¹⁰⁾.

Con los resultados obtenidos se hicieron análisis estadísticos exploratorios para conocer sus propiedades y para caracterizar su distribución. Luego se procedió a establecer si se cumplían los supuestos de normalidad y de estacionaridad requeridos para los análisis de semivariografía.

Para comprobar el supuesto de estacionaridad se llevó a cabo un análisis de tendencia espacial mediante un modelo de regresión múltiple del estilo:

$$\boxed{\text{Variable} = a + bx + cy + d(xy) + e(x^2) + f(y^2)} \quad (2)$$

Donde x, y son las coordenadas.

Cuando se obtuvo un modelo de regresión significativo al 95 %, se procedió a confirmar los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza de los residuales de dicho modelo y, cuando estos supuestos se cumplieron, se tomaron los residuales de éste para hacer los análisis de semivarianza; si no hubo modelo de regresión significativo, la semivariografía se hizo con los valores originales de la variable.

La normalidad se probó con el estadístico de Shapiro-Wilk. En caso de que la distribución de los datos (originales o residuales, según el caso) en alguna variable no fuera normal, se aceptó que por lo menos fuera simétrica y si esta condición tampoco se dio, se procedió a hacer transformaciones sencillas de los datos originales de la variable (logarítmica, raíz cuadrada o inversa) para ver si se lograba la normalización o, por lo menos, la simetrización de los datos: si se estaba trabajando con los residuales, se volvió a hacer todo el proceso de análisis de tendencia con los datos transformados.

Si con los procedimientos anteriores se pudo corregir el problema, la semivariografía se hizo con los datos transformados o con los nuevos residuales, si no, como lo que se busca en este trabajo es conocer si las variables presentan variabilidad espacial y su comportamiento aproximado, sin pretender establecer modelos que permitan hacer estimaciones de los valores de ellas con fines de elaborar mapas de isolíneas, los semivariogramas se establecieron con los datos originales, transformados o residuales que menores conflictos presentaron con los supuestos requeridos para este análisis. Todos los análisis estadísticos se hicieron con los programas Statgraphics 5.1 plus y GS+ 3.1.

3. Resultados y análisis de resultados

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos básicos de las variables analizadas. Puede observarse que la mayoría de las propiedades del suelo que fueron evaluadas tienen una variabilidad relativamente alta ya que poseen amplios rangos de valores, alta desviación estándar y altos coeficientes de variación. Además, RP y FR tienen una fuerte asimetría y, adicionalmente a la MOS, no tienen una distribución normal de sus datos.

Tabla 1. Estadísticos básicos de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia (n = 57).

<i>Variable</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Coficiente de variación (%)</i>	<i>Asimetría</i>	<i>Valor p de Shapiro-Wilk</i>
<i>RP</i>	133,02	24,11	150,0	70,0	18,12	-3,9429	2,24E-14
<i>Da</i>	1,41	0,13	1,84	0,96	9,46	-0,0779	0,4978
<i>CH</i>	6,25	0,44	7,24	5,27	7,04	0,3778	0,6417
<i>FR</i>	7,45	9,54	52,57	0,3	128,02	9,1819	0
<i>MOS</i>	6,14	2,74	11,4	3,0	44,68	1,4713	2.99E-8

Los gráficos de la Figura 4 muestran la distribución relativa de los valores (el tamaño de los círculos es proporcional al valor obtenido) que tomaron las variables estudiadas, en el campo. Puede verse que en dicha distribución los valores de Da no tienen, aparentemente, ninguna tendencia espacial en su distribución, mientras que los valores en las demás variables sí presentan una tendencia espacial que es bastante notable en la MOS. Este comportamiento en la distribución de los valores de las propiedades del suelo viola uno de los supuestos fundamentales del análisis de semivarianza, cual es el de la estacionaridad.

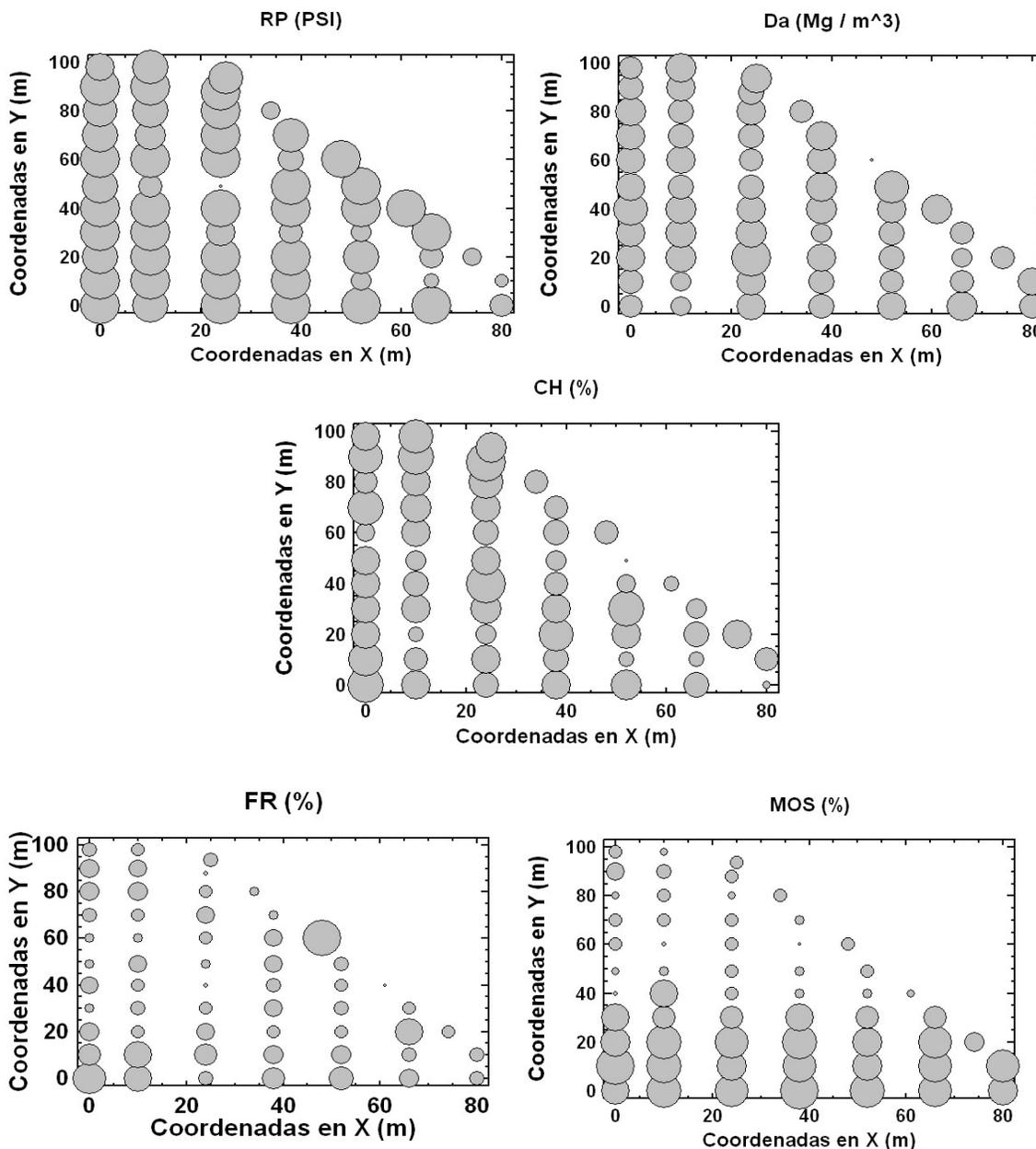
Para confirmar la presencia de la tendencia espacial mencionada se procedió a hacer análisis de regresión múltiple con cada una de las variables utilizando el modelo que se presentó en la ecuación (2). Los resultados obtenidos con este análisis se exponen en la Tabla 2 y muestran que efectivamente se presentó tendencia espacial en todas las variables, excepto en Da, como ya se había insinuado.

Tabla 2. Resultados del análisis de tendencia hecho con los valores de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia.

<i>Variable</i>	<i>Modelo</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Valor p del modelo</i>
<i>RP</i>	$RP = 144.379 - 0.396802 X$	13.66	0.0027
<i>Da</i>	<i>Sin modelo significativo</i>	-	-
<i>CH</i>	$CH = 6.46104 - 0.00754261 X$	15.02	0.0017
<i>FR</i>	$FR = 22.0702 - 0.185339 X - 0.60899 Y + 0.0054767 X Y + 0.00418376 Y^2$	18.53	0.0052

MOS	$MOS = 10.6461 - 0.184572 Y + 0.00119349 Y^2$	79.8	0
-----	---	------	---

Figura 4. Gráficos de burbujas mostrando la distribución espacial relativa de los valores de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia.



De las propiedades analizadas en este trabajo, Arango ⁽¹⁾ encontró tendencia espacial en RP y en Da en la parcela que estudió. Las diferencias encontradas entre los dos trabajos, realizados en condiciones bastante similares, pueden obedecer a las diferencias en uso y manejo a que han estado sometidos los lotes involucrados en ellos, como lo han notado Mallarino et al. ⁽⁹⁾, Cambardella y Karlen ⁽³⁾ y Paz-González et al. ⁽¹²⁾, quienes sostienen que diferencias en el uso histórico del suelo pueden generar grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. El lote en que trabajó Arango ⁽¹⁾ ha estado destinado a la producción de pasto para henificación desde 1985, mientras que el del presente trabajo ha estado sometido, permanentemente, a uso agrícola intensivo con labranza convencional.

Al encontrarse una tendencia espacial en la distribución de los valores de las propiedades del suelo, ésta debe ser eliminada para cumplir el supuesto de estacionaridad y poder realizar los análisis de semivariografía. Para lograr este propósito se debe trabajar la semivarianza con los residuales de la regresión, una vez que se haya verificado que ellos presentan distribución normal, o por lo menos simétrica, y homogeneidad de varianzas. Realizados estos procedimientos, los residuales de todas las variables tuvieron varianzas homogéneas pero los de RP y de FR no fueron ni normales ni simétricos, lo que obligó a hacerles transformaciones. Con ninguna de las transformaciones ensayadas se obtuvo normalidad ni simetría en la distribución de los residuales de estas variables. Con los resultados obtenidos con estos tratamientos se seleccionaron, finalmente, los residuales (Res) de la regresión de RP, CH, MOS y log FR y los datos originales de Da para llevar a cabo la semivariografía, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.

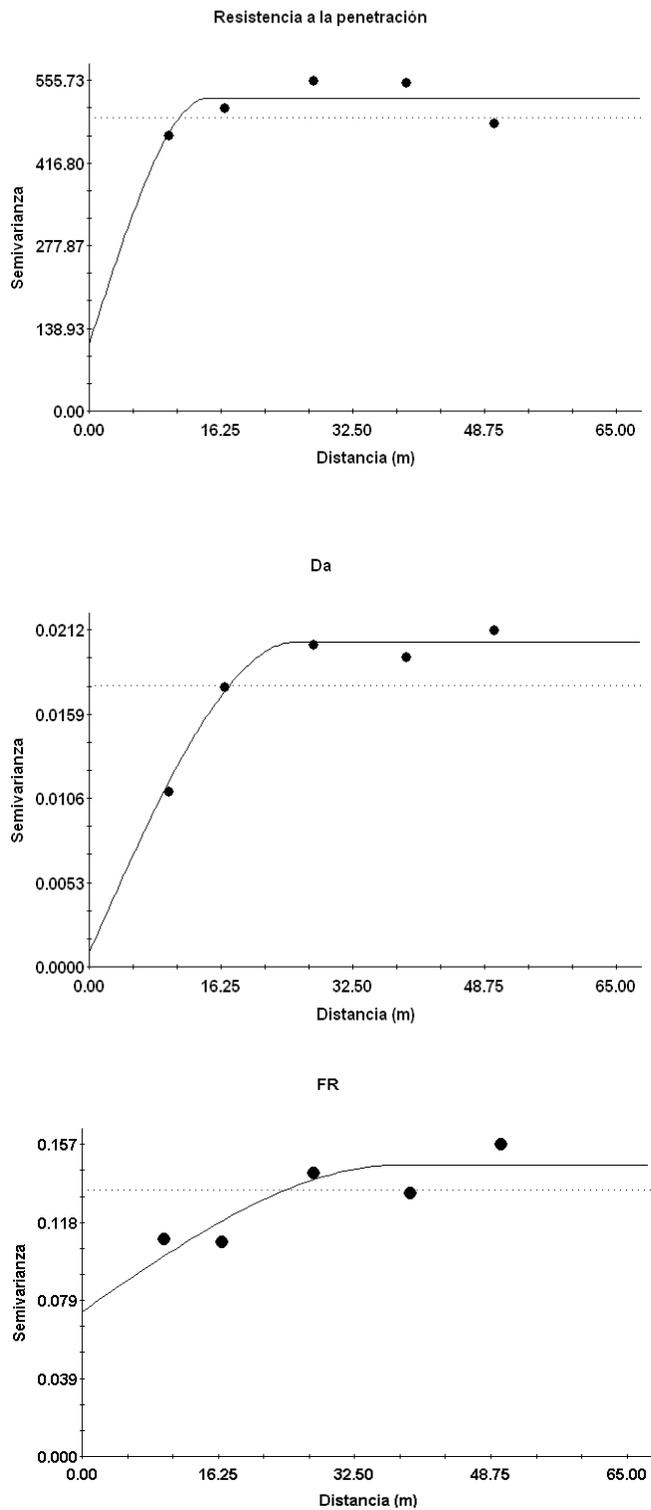
Tabla 3. Dependencia espacial de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia.

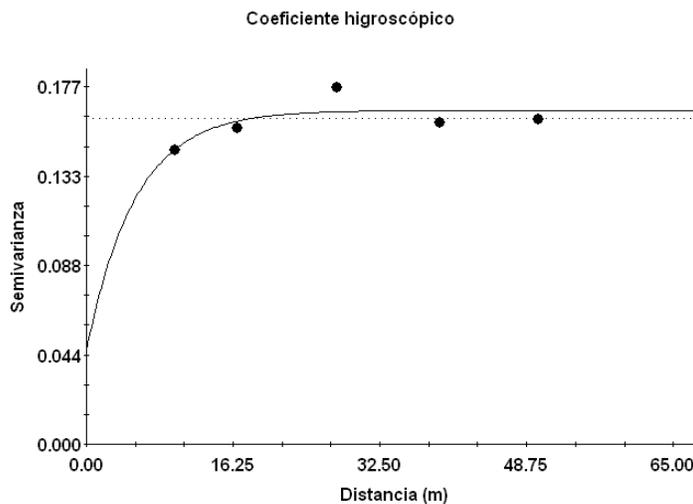
Variable	Modelo	Co	Sill	Rango (m)	C/Sill (%)	R² (%)
Res RP	Esférico	113	525.7	14.6	78.5	46.3
Da	Esférico	0.0009	0.0204	25.5	95.6	97.5
Res CH	Exponencial	0.0466	0.1652	16.2	71.8	56.9
Res log FR	Esférico	0.073	0.147	38.0	50.3	73.4
Res MOS	Nugget	1.386	1.386	-	0	-

En la Tabla 3 se observa que, exceptuando la MOS, todas las variables presentaron dependencia espacial de alta a media: el nugget representa menos del 50 % de la variabilidad total encontrada en los modelos de semivarianza. Además, los rangos de dependencia son relativamente cortos. Las características de dependencia espacial mencionadas coinciden bastante bien con las encontradas por Arango ⁽¹⁾, lo que sugiere que las diferencias en el uso y el manejo que se ha hecho en estos suelos no ha afectado de forma notable la variabilidad espacial en ambos lotes. Las gráficas de la Figura 5 ilustran los modelos teóricos que mejor se ajustaron a los semivariogramas experimentales obtenidos.

Al observar los semivariogramas experimentales llama la atención el hecho de que se presente un modelo periódico en RP y un modelo escalonado en FR. Este comportamiento ha sido interpretado como efecto de la presencia de fenómenos periódicos actuando sobre las variables ⁽¹⁵⁾, presencia de variabilidad a diferentes escalas o modelos anidados ⁽¹⁴⁾, cambios lineales en características del suelo o distribución fractal en las propiedades del suelo ⁽⁷⁾. En el caso de FR podría pensarse en que el escalonamiento observado está mostrando un patrón de sedimentación que actuó superficialmente en el suelo: recuérdese que el lote está ubicado en una terraza aluvial de un río trenzado.

Figura 5. Semivariogramas estructurados de RP, Da, FR y CH de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia.





4. Conclusiones

La resistencia a la penetración, el contenido de fragmentos de roca y el contenido de materia orgánica presentaron alta variabilidad, con un componente importante de tendencia espacial. Exceptuando la materia orgánica, que no presentó variabilidad espacial, las demás propiedades evaluadas tuvieron una dependencia espacial relativamente alta.

Toda la variabilidad encontrada en estos suelos puede estar relacionada con el uso agrícola intensivo a que han estado sometidos por más de 30 años y, en algunas propiedades que presentaron una estructura espacial especial, el tipo de material parental puede haber influenciado también esa variabilidad.

5. Agradecimientos

A la dirección de investigaciones de la Universidad Nacional - Sede Medellín (DIME) que está financiando el proyecto de investigación "Desarrollo de herramientas de arado tipo cincel para labranza de suelos de textura pesada de clima cálido seco (Santafé de Antioquia)". Al Grupo de Tribología y Superficies (GTS), al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias y al Laboratorio de Mecanización Agrícola, de la Universidad Nacional – Sede Medellín.

6. Referencias

1. Arango, L. 2004. Efecto de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con la producción del forraje del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum* (Poir) C. E. Hubbard). Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 78 p.
2. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F. y Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1501-1511.
3. Cambardella, C. A. y Karlen, D. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. Precision Agriculture 1: 5-14.
4. González, A. 1992. Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas en un Typic Haplustoll por prácticas de labranza. Tesis Maestría en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 100 p.

5. Jaramillo, D. F. 2003. La variabilidad de las propiedades del suelo y su efecto sobre el manejo de la fertilidad. En: Curso teórico-práctico sobre interpretación de análisis de suelos. Centro de Extensión y Oficina del Egresado de la Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín pp 1-19.
6. _____. 1997. Variabilidad de suelos. En: SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. Comité Regional Antioquia. Diagnostico químico de la fertilidad del suelo. Editado por Walter Osorio. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. PP. 167 – 197.
7. Krasilnikov, P. 2008. Chapter 2. Variography of discrete soil properties. In: Soil geography and geostatistics. Krasilnikov, P. et al. Eds. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxembourg. pp: 12-25.
8. Lozano, J.; Madero, E.; Tafur, H.; Herrera, O. y Amézquita, E. 2004. Distribución de un nuevo índice de compactación validado en suelos del Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 34 (2): 102-111.
9. Mallarino, A.P., Wittry, D. y Klatt, J. 2001. Using the Iowa phosphorus index and variable-rate technology for effective agronomic and environmental phosphorus management. p. 151-158. In The Integrated Crop Management Conf. Proceedings. Dec. 5-6, 2001, Ames, IA. Iowa State Univ. Extensión.
10. Motta, B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5ª. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
11. Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. 44 p.
12. Paz-González, A.; Vieira, S. R. y Taboada, M. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. Geoderma 97: 273-292.
13. Rivera, M. V. y Madero, E. 1997. Variabilidad espacial de algunas características físicas de un Vertisol del Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 27: 173-176.
14. Solomotova, E. y Sidorova, V. 2008. Chapter 3. Spatial variability of forest litters in bilberry spruce forests of Fennoscandia. In: Soil geography and geostatistics. Krasilnikov, P. et al. Eds. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxembourg. pp: 26-36.
15. Trangmar, B.B.; R. S. Yost y G. Wehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in agronomy 28: 45-94.
16. Upchurch, D. R. y Edmonds, W. J. 1992. Statistical procedures for specific objectives. In: Spatial variabilities of soils and landforms. SSSA Special publication No. 28. 2ª Ed. SSSA. Madison. pp: 49-71.

Bibliografía

ALVAREZ, R. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. En: Soil Use and Management. Vol. 21, Issue 1. 2005. p. 38–52.

ALGOUTI, A y ALGOUTI, A. Travaux pratiques. Roches sédimentaires. {En línea}. {27 Mayo de 2011} disponible en: (http://metamorphisme.voila.net/formation_2008/Sup/TP.htm).

AMEZQUITA, E. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. Encuentro Nacional de labranza de conservación. Villavicencio, Colombia. Bogotá: Guadalupe, 1998.

ARANGO, L. Efecto de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con la producción del forraje del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum* (Poir) C. E. Hubbard). Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 2004. 78 p.

ARANGO, A. Manual de laboratorio de mecánica de suelos. Universidad Nacional – Sede Medellín, Facultad de Minas. 1989. 275 p.

ASTM STANDARD. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, Annual Book of Standards, Vol. 03.02. 1987. p. 243 – 250.

_____. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus (G65). American Society for Testing & Materials, West Conshohocken, United States. 2000. 11 p.

BAMFORD, W.; Duyse, H.; Nieble, C; Rummel, F; Broch, E; Franklin, J.; Atkinson, R.; Tarkoy, P y Deere, D. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, Int. J. Rock Mech. En: Mining Sci. Geomech. Abst., 15. 1977. p. 89–97

BAYHAN, Yilmaz. Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. En: Tribology Internacional. No 39. 2006. p. 570–574.

BESTE, U. Y JACOBSON, S. Micro scale hardness distribution of rock types related to rock drill. En: Wear 254, 2003. p. 1147–1154.

BHAKAT, A.K., MISHRA, A.K., MISHRA, N.S. Y JHA, S. Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel. En: *Wear* 257. 2004. p. 338–346.

BIO- ARCHITETTURA. 2011. (Consultado en abril de 2011). {En línea}. {10 abril de 2011} disponible en: (<http://www.bio-architettura.org/es/articoli.html?start=5>).

CORTÉS, Elkin, BOTERO, J. y GÓMEZ J. Mecanización agrícola: prácticas y equipos. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2007.

DAVIS, J. R. (Editor). Surface hardening of steel. Understanding the basics. ASM international. 2002. 364 p.

DIN 50320. Wear: Terms, systematic analysis of wear processes, classification of wear phenomena. December 1979. p. 1- 8.

DE PELLEGRIN, D.V. and STACHOWIAK, G.W. Evaluating the role of particle distribution and shape in two-body abrasion by statistical simulation. En: *Tribology International* 37. 2004. p. 255–270

DIGGLE, P.J. y RIBEIRO JUNIOR, P.J. Model-based geostatistics. New York: Springer, 2007. p.12-28.

FERGUNSON, S.A.; FIELKE, J.M.; RILEY, T.W. Wear of cultivator shares in abrasive south Australian soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, Vol. 69, 1998. p. 99-105.

FIELK, J. Interaction of the cutting edge of tillage implements with soil. *Journal Agricultural Eng. Res.*; Vol. 63. No 1. 1996. p. 61–72.

FOLEY, A., LAWTON, P., BARKER, A., McLEES, V. The use of alumina ceramic to reduce wear of soil-engaging components. En: *J. Agric. Engng. Res.*, 30. 1984. p. 37 – 46.

GONZÁLEZ S., Hugo. Impacto ambiental de la labranza mecánica convencional. Trabajo de grado de Especialista, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 1999. 123 p.

_____, TORO, A., PÉREZ, W., ANAYA, M., RESTREPO, C., Resistencia al desgaste de cuchillas de arados rotativos en operación en suelos tropicales, *Scientia et Technica* 36. 2007. p. 479 – 484.

GILL, W.R.; VANDEN BERG, G.E.V. Soil dynamics in tillage and traction. Washington: U.S. Department of Agriculture. 1968. 511 p.

GLY. {En línea}. {10 julio de 2011} disponible en: (www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/HardnessTrends29IL.pdf).

GOOGLE. Foto de satélite del Centro Agropecuario Cotové (Santa Fé de Antioquia – Colombia). {En línea}. {10 Argots de 2010} disponible en: (earth.google.com).

GUUL-SIMONSEN, F., JORGENSEN, M., HAVE, H. And HAKANSSON, I. Studies of plough design and ploughing relevant to conditions in Northern Europe. *Acta Agric Scand, Sect B, Soil Plant Sci.*; 52: 57–77. 2002

INDSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. Métodos analíticos del Laboratorio de suelos. 6ª. ed. IGAC, Bogotá. 2006. 648 p.

HAMBLIN, M.G y STACHOWIAK, G.W. A multi-scale measure of particle abrasivity. En: *Wear*. Vol. 185. 1995. p. 225-233.

HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction wear of engineering Materials. ed. Edward Arnold. London. 1992. 273 p.

IBÁÑEZ, C., PALOMEQUE, S y FONTÚRBEL, F. Elementos principales del suelo, geodinámica y dinámica de los principales componentes del suelo. En: Fontúrbel. Ibáñez, C. y Abruzzese (eds). *El Recurso suelo: Bases edafológicas, problemática, administración y contaminación*. CD-ROM interactivo. Ed. Publicaciones integrales, La Paz. 2004.

JARAMILLO, D. El suelo: Origen, Propiedades, Especialidad. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2011. 553 p.

KAROONBOONYANAN, Satit; SALOKHE, Vilas and NIRANATLUMPONG, Panadda. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades. En: *Wear*. Vol. 263. 2007. p. 604–608

KELLY, D. Y HUTCHINGS, I. 2001. A new method for measurement of particle abrasivity. En: *Wear*. Vol. 250. p. 76–80.

KERRY, R. and OLIVER, M. Average variograms to guide soil sampling. En: *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 5, Issue 4. 2004. p. 307-325.

KONTA, Jiří. Phyllosilicates in the sediment-forming processes: weathering, erosion, transportation, and deposition. En: *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 6, No. 1 (153), 13–43. {En línea}. {6 de octubre de 2011} disponible en: (www.irsm.cas.cz/abstracts/AGG/01_09/1_Konta.pdf). 2009.

LEAVERS, V. Use of the Two-Dimensional Radon Transform to Generate a Taxonomy of Shape for the Characterization of Abrasive Powder Particles. En: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Vol. 22, No. 12, December. 2000. p. 1411 - 1423

LOZANO, Z.; BRAVO, C.; OVALLES, F.; HERNÁNDEZ, R.; MORENO, B.; PIÑANGO, L. y VILLANUEVA, J. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a

partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. En: Bioagro. Vol. 16. 2004. p.61-72.

LUQUE, Jorge, NAKAMATSU, V., CIANO, N., LISONI, C. y QUINTEROS, J. Uso de maquinarias agrícolas en la recuperación de suelos afectados por derrames de petróleo. En línea. {2 de noviembre de 2007} disponible en: (www.inta.gov.ar/chubut/info/documentos/rrnn/maq_agri.pdf).

LU-QUAN, Ren; JIN, Tong; JIAN-QIAO, Li and BING-CONG, Chen. Soil Adhesion and Biomimetics of Soil-engaging Components: a Review. En: J. agric. Engng Res. 79 (3). 2001. p. 239 – 263.

MIKLI, Valdek; HELMO, KÄERDI, Helmo; KULU, Priit and BESTERCI, Michal. characterization of powder particle morphology . En: Estonian Acad. Sci. Eng. Vol. 7, No. 1. 2001. p. 22–34.

MOORE, M. A. Abrasive wear by soil. En: Tribology International. Vol. 8, Issue 3. 1975. p. 105-110.

MOTTA, B. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5ª. Ed. IGAC. Bogotá. 1990. 502 p.

MURPHY, G. Similitude in engineering. New York. Ronald Press. 1950. 302 p.

NATSIS, A.; PETROPOULOS, G. y PANDAZARAS, C. Influence of local soil conditions on mouldboard ploughshare abrasive wear. En: Tribology International. Vol. 41. 2008. p. 151–157.

NATSIS, A.; Papadakis, G.; Pitsilis, J. The Influence of Soil Type, Soil Water and Share Sharpness of a Mouldboard Plough on Energy Consumption, Rate of Work and Tillage Quality. En: J. Agric. Engng Res. Vol. 72. 1999. p. 171-176.

NETTOPDF. The hardness scale introduced by Friederich Mohs. {En línea}. {10 Agosto de 2011} disponible en: (<http://nettopdf.info/download/pdf/The%20hardness%20scale%20introduced%20by%20Friederich%20Mohs%20The%20hardness%20of%20aHR0cDovL3d3dy5ycGkuZWR1L35zY2h1YmVydC9FZHVjYXRpb25hbC1yZXNvdXJjZXMvTWFOZXJpYWxzLUhhcmRuZXNzLnBkZg>).

NILSEN, B., DATIL, F., HOLZHÄUSER, J y RALOIGH, P. Abrasivity testing for rock and soils. Abrasivity & wear. 2007.

OWSIAK, Z. Wear of symmetrical wedge-shaped tillage tools. En: Soil & Tillage Research, Amsterdam, Vol. 43. 1997. p. 295-308.

_____. Wear of spring tine cultivator points in sandy loam and light clay soils in southern Poland. En: Soil & Tillage Research. Vol. 50, 1999. p. 333 – 340

RAADNUI, S. Wear particle analysis—utilization of quantitative computer image analysis: A review. En: *Tribology International*. Vol. 38. 2005. p. 871–878

RABINOWICZ, E. Friction and Wear of Materials. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1965. p. 167 – 172.

RICHARDSON, R. The wear of metallic by soil – practical phenomena. En: *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 12, No. 1. 1967. p. 22- 39.

SEDRIKS, A.J. y MULHEARN, T.O. ‘Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes’. En: *Wear*. Vol. 6. 1963. p. 457-466.

SERVERDEV, M. M. (Editor). Wear of agricultural machine part. Translator: S.K. Kaila. Translate and published for the U.S. Department of Agriculture. Washington, D. C. 1984. 249 p.

SPAGNOLO, R. ; BAUER, G. ; MACHADO, A.; ESPÍRITO SANTO, A. ; BATISTA, V.; SILVEIRA, H. ; NUNES, G. Estimativa da vida útil da ponteira de semeadora de plantio direto através da observação de sua área superficial. En: XIV Congresso de Iniciação Científica - VII Encontro de Pós-Graduação - UFPel, Pelotas. Vol. 1. 2006

STACHOWIAK, G. Numerical characterization of wear particles morphology and angularity of particles and surfaces. En: *Tribology International*. Vol. 31, No. 1–3. 1998. p. 139–157.

_____. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. En: *Wear* 241. 2000. p. 214–219.

_____. y PODSIADLO, P. Towards the development of an automated wear particle classification system. En: *Tribology International*. Vol. 39. 2006. p. 1615–1623

_____. y STACHOWIAK, G.W. The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear. En: *Wear*. Vol. 249. 2001. p. 201–207.

_____. y PODSIADLO, P. Characterization and classification of wear particles and surfaces. En: *Wear*. Vol. 249. 2001. p. 194–200

_____. y PODSIADLO, P. Evaluation of boundary fractal methods for the characterization of wear particles. En: *Wear*. Vol. 217. 1998. p. 24 – 44.

_____. STACHOWIAK, G.W. y PODSIADLO, P. Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features. En: *Tribology International*. Vol. 41. 2008.

SWANSON, P.A. Comparison of laboratory abrasion tests and field tests of materials used in tillage equipment. In: A.W. Ruff and R.G. Bayer, Editors, Tribology: Wear Test Selection for Design and Application, ASTM STP 1199, ASTM, Philadelphia. 1993.

_____. and VETTER, A.F. The Measurement of Abrasive Particle Shape and Its Effect on Wear. En: Tribology Transactions. Vol. 28, No. 2. 1985. p. 225 — 230

SZWEDZICKI, T. Indentation hardness testing of rock. En: Int. J. Rock Mech. Mineral Sci. Vol. 35. 1998. p. 825–829.

TORO B., Alejandro. Desgaste abrasivo de cuchillas en la preparación de caña de azúcar. Proyecto Colciencias. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2003.

TORRANCE, A. A. An explanation of the hardness differential needed for abrasion. En: Wear, Volume 68, Issue 2. 1981. p. 263-266.

TYLCZAK, J., JEFFERY A. HAWK, J. y WILSON, R. A comparison of laboratory abrasion and field wear results. En: Wear. Vol. 225–229. 1999. p. 1059–1069

USDA (DEPARTMENT OF AGRICULTURE. SOIL SURVEY DIVISION). Soil survey manual. Jodhpur, India : Scientific Publishers. XV. 2004. 435 p.

VALLEJO, G. y CAMARGO, D. Respuesta del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum* (Pair) C.E Hubbard) a la fertilización química y biológica de un Alfisol de Santafé de Antioquia. Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1998. 62 p.

VIDONI, Daniel. {En línea}. {2 de mayo de 2011} disponible en: (http://www.thatcrystalsite.com/products/product-details.php?cat_id=7&product_id=4373).

WINKLER, E. 1994. Stone in architecture: properties, durability. 3a. Ed. Springer. Printed Germany. 2004. p. 37 - 38.

YU, H.J. y BHOLE, S.D. Development of a prototype abrasive wear tester for tillage tool materials. En: Tribology International. Vol. 23, No. 5. 1990. p. 309 – 316.

ZOLLINGER, O. O., BECKHAM, J. E., MONROE, C. What to know before selecting hardfacing electrodes. En: Welding Journal. 1998. p. 39-43.

ZUM GAHR, Kart – Heinz. Wear by hard particles. En: Tribology International. Vol. 31, No. 10. 1998. p. 587–596.

_____. Microstructure and wear of materials. Amsterdam: Elsevier. 1987. p. 80 – 350.