

Estado de degradación de ultisoles bajo diferentes sistemas de control de malezas en cultivos de yerba mate en Misiones.

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencia del Suelo*

Sebastián Ernesto Barbaro

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional del Nordeste- 2004

Lugar de trabajo: INTA, E.E.A, Cerro Azul-Misiones.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Miguel Ángel Taboada

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Docteur en Eco- et Agrosystèmes (Institut Nationale Polytechnique
de Toulouse, Francia)

Consejera de Estudios

Carina Rosa Álvarez

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

JURADO

Humberto Carlos Dalurzo

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Nordeste)
Doctor de Suelos, Agua y Medioambiente (Universidad de Lleida, España)

JURADO

Olga Susana Heredia

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Doctora (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Carlos Germán Soracco

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de La Plata)
Doctor en Ciencias Agrarias y Forestales (Universidad Nacional de La Plata)

Fecha de defensa de la tesis: 19 de septiembre de 2017

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Sebastián Ernesto Barbaro

Índice general

Capítulo I. Introducción general.....	1
1. Problemática estudiada.....	1
2. Características geográficas y cultivo.....	2
2.1 Ubicación geográfica, clima y vegetación.....	2
2.2 Suelos de la Provincia de Misiones.....	2
2.3 Características del cultivo de YM.....	3
3. Antecedentes.....	4
3.1 Manejo de suelos tropicales.....	4
3.2 Carbono orgánico en suelos tropicales.....	5
3.3 Propiedades edáficas, indicadores de calidad de suelo.....	5
4. Estado de la investigación en suelos rojos.....	7
5. Objetivos.....	9
Capítulo II. Materiales y métodos generales.....	10
1. Organización de la tesis.....	10
2. Sitios de muestreo.....	10
3. Muestreos a campo y metodologías empleadas.....	13
4. Diseño y análisis estadístico.....	16
Capítulo III. Evaluación de sistemas de control de malezas en YM.....	17
1. Introducción.....	17
1.1 Antecedentes específicos.....	17
1.2 Estado del arte sobre manejos de Ultisoles en Misiones.....	18
2. Objetivos e hipótesis general.....	19
2.1 Objetivos e hipótesis específica.....	19
3. Materiales y métodos.....	20
3.1 Caracterización de sitios.....	20
3.2 Determinaciones específicas y profundidades de muestreos.....	22
3.3 Análisis estadístico.....	23
4. Resultados.....	24
5. Discusión.....	30
6. Conclusiones.....	34
Capítulo IV. Relación entre el COS y las propiedades físicas en Ultisoles...	35
1. Introducción.....	35
1.1 Antecedentes específicos en suelos tropicales.....	35
1.2 Estado del arte en Ultisoles de Misiones.....	36
2. Objetivo e hipótesis generales.....	36
2.1 Objetivos e hipótesis específicos.....	36
3. Materiales y métodos.....	37
3.1 Caracterización de sitios.....	37
3.2 Determinaciones específicas.....	39
3.3 Análisis estadístico.....	39
4. Resultados.....	39
5. Discusión.....	47
6. Conclusión.....	49
Capítulo V. Indicadores de calidad de suelo en Ultisoles.....	50
1. Introducción.....	50

1.1 Antecedentes específicos.....	50
1.2 Estado del arte en Ultisoles de Misiones.....	51
2. Objetivos e hipótesis.....	51
2.1 Objetivos e hipótesis específicos.....	51
3. Material y método.....	52
3.1 Caracterización de los sitios.....	52
3.2 Determinaciones específicas.....	52
3.3 Diseño estadístico.....	52
4. Resultados.....	53
5. Discusión.....	55
6. Conclusiones.....	56
Capítulo VI. Conclusiones generales y recomendación agronómica.....	57
1. Situación motivadora.....	57
2. Conclusiones generales.....	57
3. Principales hallazgos.....	58
4. Recomendaciones agronómicas.....	59
Capítulo VII. Bibliografía.....	60
Anexos.....	73

Índice de tablas

Capítulo II. Materiales y métodos generales	
Tabla 1 Ubicación de parcelas por localidad.....	10
Capítulo III. Evaluación de sistemas de control de malezas en YM	
Tabla 1 Parcelas del grupo 1, Granulometría, manejo y parcela con la cual esta apareado el tratamiento.....	22
Tabla 2 Mediciones de la concentración y stock de carbono en suelo.....	24
Tabla 3 Valores de COS y SC EF en las parcelas de selva nativa.....	25
Tabla 4 Prueba T para muestras apareadas del SC EF y SC ESE.....	26
Tabla 5 Densidad aparente en distintos sistemas de control de malezas a diferentes profundidades.....	27
Tabla 6 Cambio del diámetro medio ponderado, en distintos sistemas de control de malezas a diferentes profundidades.....	28
Tabla 7 Resistencia mecánica a la penetración en distintos sistemas de control de malezas a diferentes profundidades.....	28
Tabla 8 Tasa de infiltración en distintos sistemas de control de malezas.....	29
Tabla 9 Porcentaje de cobertura en distintos controles de malezas.....	29
Capítulo IV. Relación entre el COS y las propiedades físicas en Ultisoles	
Tabla 1 Características de manejo y calidad de las parcelas muestreadas.....	37
Capítulo V. Indicadores de calidad de suelo en Ultisoles	
Tabla 1 Matriz de correlación entre los indicadores evaluados.....	53
Tabla 2 Valores de los autovectores e1 y e2 de los indicadores evaluados...	53
Tabla 3 Valores de autovalores.....	54
Tabla 4 Valores frecuentes y de referencia de los indicadores evaluados...	55

Índice de figuras

Capítulo II. Materiales y métodos generales

Figura 1	Zona de muestreo.....	13
Figura 2	Entre lineo de una plantación de YM.....	13

Capítulo III. Evaluación de sistemas de control de malezas en YM

Figura 1	Control mecánico con rastra de discos remoción de suelo.....	20
Figura 2	Control de mecánico de malezas con desmalezadora.....	21
Figura 3	Control químico de malezas	21

Capítulo IV. Relación entre el COS y las propiedades físicas en Ultisoles.

Figura 1	Porcentaje del COS en las parcelas muestreadas. Valores de los espesores E1 y E2.....	39
Figura 2	Relación entre la Densidad aparente y el contenido de carbono orgánico del suelo en el E1.....	40
Figura 3	Relación entre la Densidad aparente y el contenido de carbono orgánico del suelo en el E2.....	40
Figura 4	Relación entre la humedad de suelo y la densidad aparente.....	41
Figura 5	Relación entre el cambio del diámetro medio ponderado y el contenido de carbono orgánico del suelo en el E1.....	42
Figura 6	Relación entre el cambio del diámetro medio ponderado y el contenido de carbono orgánico del suelo en el E2.....	42
Figura 7	Relación de la resistencia mecánica y la humedad en el E1.....	43
Figura 8	Relación de la resistencia mecánica y la humedad en el E2.....	43
Figura 9	Relación entre la tasa de infiltración medida y el contenido de carbono orgánico del suelo en del E1.....	44
Figura 10	Relación entre el % de cobertura de suelo y el contenido de carbono orgánico en el E1.....	44
Figura 11	Relaciones entre la tasa de infiltración y la densidad aparente en el E1.....	45
Figura 12	Relaciones entre la tasa de infiltración y el cambio del diámetro medio ponderado.....	46
Figura 13	Relaciones entre el % de cobertura y la tasa de infiltración.....	46

Capítulo V. Indicadores de calidad de suelo en Ultisoles

Figura 1	Bi-plot del ACP para los indicadores de calidad de suelo clasificados por el manejo de suelo para el control de malezas.....	53
----------	--	----

Abreviaturas

MO	Materia orgánica
YM	Yerba Mate
COS	Carbono orgánico del suelo
Dap	Densidad aparente
RM	Resistencia mecánica a la penetración de las raíces
CDMP	Cambio del diámetro medio ponderado
Ti	Tasa de infiltración
SC	Stock de carbono
SC EF	Stock de carbono a espesor fijo
SC ESE	Stock de carbono a espesor de suelo equivalente
CMD	Conjunto mínimo de datos
APC	Análisis de componentes principales
EE	Error estándar
H	Herbicida
M	Macheteo
R	Rastra
S	Selva nativa
E	Espesor de suelo

Estado de degradación de Ultisoles bajo diferentes sistemas de control de malezas en cultivos de Yerba Mate en Misiones.

Resumen

La yerba mate se considera el cultivo madre de la Provincia de Misiones. Los primeros yerbales cultivados con fines comerciales fueron realizados por inmigrantes europeos quienes realizaban el control de las malezas con sistemas basados en la remoción del suelo. Su implementación por muchos años causó pérdidas de fertilidad, deterioro de la calidad física y pérdida de suelo por erosión hídrica. Las investigaciones sobre manejos de suelo en Ultisoles como los de Misiones, con condiciones climáticas muy agresivas son aún escasas. Una idea motivadora de esta Tesis fue si la pérdida de calidad de suelo por el cambio de uso de selva nativa a plantaciones de yerba mate puede minimizarse, si se emplean técnicas de control de malezas adecuadas para este ambiente. En esta tesis se evaluaron los tres sistemas de control de malezas más utilizados en yerbales plantados en Ultisoles de Misiones. Ellos son: a) Control con rastra (de discos); b) control con herbicida (glifosato); y c) control con macheteadora (desmalezadora). Los objetivos fueron a) identificar las mejores estrategias de manejo del suelo para controlar las malezas, de forma de minimizar ulteriores pérdidas de calidad de suelo respecto a la selva tropical; b) analizar la relación entre el carbono orgánico del suelo COS y la calidad de la estructura; y c) establecer un conjunto mínimo de datos (CMD) que sirvan de indicadores para evaluar el estado de calidad de los suelos. Los resultados indican que el control con macheteadora generó la menor pérdida de COS en el perfil (22%) y produjo las mejores condiciones estructurales para el funcionamiento físico del suelo, seguido por el herbicida con pérdida de COS del 27%. El manejo con rastra fue el más dañino para la estructura del suelo, generando un 35 % de pérdida de COS en un metro de profundidad, respecto a la selva nativa. El COS explico entre un 25 y 45 % las variaciones en la mayoría de las propiedades físicas medidas, existiendo una menor relación en profundidad. Esto permite atribuir el resto de la variación de las propiedades físicas a otros factores, entre ellos, los relacionados con la matriz inorgánica conformada por óxidos e hidróxidos de Fe y Al. El CMD quedó integrado por el COS, el cambio del diámetro medio ponderado (CDMP) y la tasa de infiltración (Ti). Los resultados permiten recomendar la utilización de la macheteadora para el control de las malezas con el fin de “manejar el suelo vivo”. No se han encontrado en general valores extremos que hagan suponer problemas graves de compactación o mala calidad estructural, presentando un estado moderado o regular de degradación de los suelos con plantaciones de yerba mate. No obstante, se destaca la importancia de dejar cubiertos los suelos para minimizar pérdidas erosivas de suelo.

Palabras claves

Cultivo regional, manejo de malezas, suelos tropicales, carbono orgánico, calidad de suelo, indicadores físicos.

Stage of degradation of soils under different weed control systems in yerba mate crops in Misiones.

Abstract

Yerba mate is considered as the main crop in the province of Misiones. The first plantations commercially cultivated were carried out by European immigrants, who performed the weed control by soil removal systems. Its implementation for many years was responsible for losses of fertility, decline in physical quality and loss of soil by water erosion. Researches on soil management in Ultisols, similar as found in Misiones -under very aggressive weather conditions- are still scarce. The hypothesis of this work is based on whether the loss of soil quality, by changing the use of native forest to plantations of Yerba Mate, can be minimized if suitable control weed techniques are applied for this environment. Three weed control systems, most commonly used in Yerba mate plantations on Ultisols of Misiones, were evaluated: a) harrow plow (disc); b) herbicide (glyphosate), and c) brush cutter. The objectives were: a) identify best land management strategies to control weeds, in order to minimize further loss of soil quality respect to the rainforest; b) analyze the relationship between soil organic carbon SOC and the quality of soil structure; c) determine a minimum data set (MSD) to be used as indicators to assess the state of soil quality. Results show that brush cutter control produced the lowest loss of SOC in the profile (22%), promoting the best structural conditions for soil physical functioning, followed by herbicide (27%). The harrow management was the most damaging to the soil structure, causing a 35% loss of SOC in a meter deep, with regard to native forest. The COS explains between 25 and 45% variations in most of the measured physical properties, with a lower depth ratio. This allows to attribute the rest of the variation of the physical properties to other factors, among them, those related to the inorganic matrix conformed by oxides and hydroxides of Fe and Al. The MSD was composed by the COS, the change of the weighted average diameter (CWAD) and infiltration rate (iT). The results allow recommend the use of brush cutter for weed control in order to "manage the living soil". There are no extreme values which indicate serious structural compaction or poor quality, presenting a moderate or regular state of degradation with Yerba mate plantations. However, it is important to keep the soil covered to minimize erosive soil loss.

Key words

Regional farming, weed management, tropical soils, organic carbon, soil quality, physical indicators.

Capítulo I. Introducción general.

1. Problemática estudiada.

La superficie cultivada con Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire), YM, asciende a 207.604 ha involucrando a 17841 productores, de los cuales, el 75% producen YM en menos de 10 ha (INYM, 2012). El rendimiento promedio general es 5.400 kg de hoja verde por hectárea, siendo aún inferior el rendimiento del 75% de productores, 3.178 kg ha⁻¹ (INYM, 2012). Estos rendimientos están muy por debajo del potencial de una plantación de YM que debería llegar a unos 15.000 kg ha⁻¹.

Los primeros yerbales cultivados con fines comerciales fueron realizados por inmigrantes europeos quienes aplicaron métodos de cultivos propios de sus lugares de inmigración. Estos sistemas de cultivos estaban basados en la remoción de suelo para el control de las malezas, su aplicación por años pudieron ser la causa de pérdidas de fertilidad, deterioro de la estabilidad estructural de los suelos conduciendo a bajos rendimientos de YM y afectando la rentabilidad de la producción.

Las adiciones de carbono al suelo se reducen drásticamente cuando la selva original se reemplaza por cultivos, pues los residuos de estos últimos aportan un volumen de material menor que el anteriormente adicionado por el bosque, siendo sus impactos aún poco conocidos sobre las propiedades físicas de los suelos (Djegui *et al.*, 1992; Piccolo, 1996). En el cultivo de YM, la cosecha consiste en la extracción de las ramas y hojas, por lo tanto, los únicos ingresos de carbono al suelo lo realizan las malezas que crecen en los espacios que quedan entre los líneas de la plantación de YM (entre lineo), donde el sistema de labranza empleado para controlar estas malezas determinará la rapidez de descomposición y cobertura de suelo, determinando su estabilidad estructural y fertilidad.

Los productores recurren a diferentes estrategias de control de malezas, pero se conoce muy poco sobre cuál de estos manejos deteriora menos la calidad de los suelos. Uno de los principales desafíos de la ciencia del suelo hoy en día es el estudio de las propiedades de los suelos tropicales y subtropicales, los cuales han tenido tradicionalmente menor atención que los de regiones templadas (Hartemink, 2002; Sánchez, 2002). Se han realizado y se realizan numerosas investigaciones sobre manejo de suelo en las zonas templadas del país como por ejemplo la Pampa Húmeda, pero hay relativamente muy pocas investigaciones en zonas subtropicales como la Provincia de Misiones.

2. Características geográficas y cultivo.

2.1 Ubicación geográfica, clima y vegetación.

La Provincia de Misiones se encuentra ubicada en el extremo nordeste de la República Argentina, ocupa una superficie de 29.801 km², limita al norte y al este con la República de Brasil; al sur lo sigue haciendo con la República de Brasil y también con la Provincia de Corrientes; y al oeste con la República del Paraguay. Sus puntos extremos son: 25° 28' y 28° 10' de latitud sur y 53° 38' 52" y 56° 03' de longitud oeste.

El clima es de tipo subtropical, isohigro, sin estación seca definida. Las lluvias varían entre 1900 y 2000 mm. La temperatura media anual oscila en torno de los 20° C, disminuyendo hacia el este-noreste a causa de la mayor altitud. La amplitud térmica media anual es de 11° C y se registran de 2 a 4 heladas por año en las áreas cercanas a los grandes ríos, y más de 9 heladas por año en las zonas más altas (INTA, 1990).

La vegetación nativa se caracteriza por ser una formación pluri-estratificada de selva húmeda, conformada por seis estratos que definen su estructura vertical: Emergentes, Dosel, Intermedios, Sotobosque, Herbáceo, y un estrato Muscinal. También se encuentra una fuerte presencia de Bambúceas, lianas, epífitas. Entre las especies arbóreas más abundantes y características cabe mencionar: Pino paraná (*Araucaria angustifolia*), Guatambú (*Balfourodendron riedelianum*), Cedro misionero (*Cedrela fissilis*), Loro negro o Peteribi (*Cordia trichotoma*), Laurel negro (*Nectandra megapotamica*), Laurel amarillo (*Nectandra lanceolata*), Caña fistula (*Peltophorium dubium*), Lapacho negro (*Handroanthus heptaphyllus*). El desarrollo que alcanza esta selva decrece desde el norte hacia el sur. En su región meridional se encuentra una zona de transición, con vegetación de pastos duros a semiduros asociados a bosques en galerías, que luego deja hacia el sur lugar a la zona de campos (Martínez Crovetto, 1963).

2.2 Suelos de la Provincia de Misiones.

Los suelos de la Provincia de Misiones se podrían agrupar en forma práctica en cuatro grupos, tal como surge de la cartografía a escala de reconocimiento existente de suelos y ambientes (Cruzate *et al.*, 2007):

- a) Los denominados “rojos profundos” totalizan 962.408 ha (32.7 % del total provincial), con predominancia de Ultisoles. Las plantaciones de YM están instaladas en su mayoría sobre dichos órdenes, en los grandes grupos de Kandiodultes. También se encuentra presente pero en menor porcentaje suelos del orden Oxisoles. Se localizan en relieve suavemente ondulado y ondulado, con pendientes comprendidas entre el 5% y el 15%.
- b) Los llamados “Toscósos”, en su gran mayoría someros, ocupan 1.029.731 ha (35 % del total provincial); de los cuales 103.411 ha son afloramientos rocosos. Dentro de este grupo se identificaron Molisoles muy poco evolucionados, Entisoles e Inceptisoles. Se desarrollan en relieve fuertemente ondulado a escarpado.
- c) Los llamados suelos “pardos”, cubren 651.952 ha, son de profundidad variable, generalmente inferior a 200 cm, algunos presentan fragmentos gruesos en porcentaje variable. Predominando los Alfisoles en relieve suavemente ondulado, INTA (1990).

d) El área ocupada por suelos hidromórficos, son de limitado uso agrícola, ocupa unas 136.376 ha, cerca del 5 % de la superficie provincial. Se presentan fundamentalmente en áreas bajas y anegables de valles aluviales, Predominan Molisoles y Alfisoles.

El material originario de estos suelos es el denominado basalto tholeítico de Misiones (Teruggi, 1955), sobre el cual han evolucionado los suelos de los cuatro grupos antes mencionados. Los suelos correspondientes al orden Ultisoles han sufrido una alteración profunda de los silicatos, por procesos de laterización típica de ambientes tropicales. El gran grupo de los Kandiodultes son suelos profundos, su estructura es favorable pese al elevado porcentaje de arcilla que contienen, son los más utilizados para las plantaciones de YM. Sus características principales son la presencia de un horizonte Kándico y la baja saturación de bases en el perfil, que debido a las condiciones climáticas en que evolucionan, se produce una alteración rápida y compleja de los materiales intemperizables con formación de arcillas y óxidos. Presentan un horizonte superficial bien provisto de materia orgánica seguido por un B textural muy profundo, 180 cm (Godagnone & De la Fuente, 2013).

La mayor parte de la arcilla es caoliníta (retículo 1:1), existiendo además un elevado tenor de sesquióxidos que permiten la formación de agregados estructurales muy estables. Las estructuras predominantes son granular y en bloques angulares y subangulares en el horizonte A, y prismáticas en el B. El drenaje es bueno para el horizonte A, siendo algo más lento en el Bt de acumulación de arcilla (C.A.R.T.A, 1964).

2.3 Características del cultivo de YM.

La YM es una planta originaria de América del sur que abunda en estado silvestre y en plantaciones cultivadas. En estado silvestre es un árbol que requiere de unos 30 años para llegar a su desarrollo completo, alcanzando alturas de entre 12 a 16 metros con un tronco de entre 50 a 70 cm de diámetro. En plantaciones comerciales la altura es mantenida hasta los 3 m aproximadamente con prácticas de podas y cosechas sucesivas. Las hojas de la YM son el producto utilizado de esta plana, la cosecha se realiza junto a la poda donde se forma y preparan las ramas y estructura de la planta para el siguiente año, a la vez que se extraen las hojas correspondientes a la cosecha propiamente dicha o también llamada “Tarefa”. Si bien en yerbales recién implantados la cosecha se inicia hacia el cuarto año, recién en el séptimo u octavo año las cosechas comienzan a tener un rendimiento comercial más aceptable.

El período de cosecha generalizado se extiende desde marzo hasta octubre. Las distancias de plantaciones son variables siendo las más antiguas de 4 x 4 o 4 x 3 m que aún son productivas, llegando a tener 70 u 80 años de edad. Las plantaciones más comunes actualmente tienen 1.600 plantas por hectárea en marcos de 3 x 2 m. Actualmente se plantan en alta densidad superando las 2.200 plantas en marcos de 3 x 1,5 o 3 x 1. También se utilizan hileras simples, dobles y hasta triples filas de plantas con densidades de más de 4.000 plantas.

Las labores culturales para el control de las malezas, en su mayoría gramíneas, dependerán del marco de plantación. Actualmente, en el sistema de producción de YM el control de malezas se realiza de la siguiente manera: a) con remoción de suelo, utilizando la rastra de discos común en plantaciones antiguas con marcos 4 x 4 y 4 x 3 m, pero también

utilizado hasta el día de hoy en marcos de 3 x 2; b) realizando el control químico con herbicida, esta práctica es factible en todos los marcos de plantación si es realizada con mochila de 20 l, es lo más común, o si se aplica con pulverizadora mecánica, es limitada a marcos de plantación que permitan el ingreso del tractor; c) sin remoción de suelo, utilizando una desmalezadora de eje vertical enganchada al tres puntos del tractor, también en los últimos años se utiliza la moto guadaña como otra opción. Comúnmente se realiza en marcos de 3 x 2 m aunque la moto guadaña se puede utilizar en plantaciones de alta densidad.

Otra práctica menos difundida es mediante el uso de abonos verdes implantados que ya han sido estudiadas por diversos autores (Erracaborde, 1973; Piccolo, 1996; Heredia *et al.* 2005), sin embargo el control de estos abonos verdes es mediante alguno de los descriptos en el párrafo anterior. Los beneficios de estas coberturas dependen de la adaptación que tengan al suelo, sobre todo al pH y deficiente fertilidad, también a factores climáticos, ataque de plagas como la hormiga, enfermedades y además a la mineralogía de cada zona (Piccolo 2001a; Heredia *et al.*, 2005).

3. Antecedentes

3.1 Manejo de suelos tropicales.

Según Sanchez (1981), uno de los factores que actualmente limita la utilización de áreas tropicales aptas para la producción de cultivos es la falta de conocimientos de cómo manejar los Oxisoles y Ultisoles altamente meteorizados, los que actualmente están ocupados por bosques pluviales o vegetación de sabanas. Los Ultisoles como los existentes en la Provincia de Misiones son muy frágiles, si bien pueden poseer adecuada fertilidad natural, las características agresivas del clima subtropical, sin estación seca, con elevadas temperaturas, régimen pluviométrico de tipo torrencial (Margalot, 1994) y el relieve colinado con fuertes pendientes (Ligier *et al.*, 1990), favorece que ocurran importantes pérdidas de suelo por procesos erosivos (Erracaborde, 1973; Casas *et al.*, 1983; Piccolo, 1996). Estas características muestran que en los suelos tropicales existe un funcionamiento muy diferente al de los suelos templados, diferencia que resulta clave para comprender las razones del fracaso de tecnologías agrícolas importadas, la escasa comprensión de esta diferencia ha traído como consecuencia la profunda degradación de los suelos tropicales (Louman *et al.*, 2001).

En suelos rojos del Brasil, Primavesi (1980), concluyó que estos suelos necesitan protección contra el sobrecalentamiento, la evapotranspiración y la lluvia. Esto puede lograrse usando cobertura como mantillo u hojarascas o practicando la labranza cero. Estos manejos deben basarse en los procesos vegetativos y no en prácticas mecánicas. El retiro de la cobertura vegetal con posterior instalación de cultivos o pastoreos lleva a cambios biofísicos del suelo como: reducción de materia orgánica (MO), compactación, reducción de la infiltración, aumento del escurrimiento superficial, erosión de suelo, entre otras (Morgan, 2005). Las labranzas no solo pueden acelerar la mineralización de la MO (Derpsch *et al.*, 1991; Studdert & Echeverría, 2000), si no también producen estratificación de la misma en el perfil. El surgimiento de daños causados por la erosión en áreas cultivadas no es más que un síntoma de que fueron empleados métodos de cultivo

inadecuados para determinada área y su ecosistema (Lal, 1982). La habilidad con que un suelo puede almacenar y transmitir agua está determinada por sus propiedades hidráulicas (capacidad hídrica, conductividad hidráulica), las cuales a su vez dependen de la geometría de su espacio poroso, la cual es modificada por las labranzas (Pla Sentis, 1994).

3.2 Carbono orgánico en suelos tropicales

El carbono orgánico del suelo se relaciona directamente con la materia orgánica MO por la siguiente ecuación:

$$\text{COS [g kg}^{-1}\text{]} = \text{MO [g kg}^{-1}\text{]} / 1,76$$

En climas secos y fríos, la mineralización es lenta y hay gran acumulación de carbono (Ellis & Mellor, 1995), con formación de compuestos muy resistentes a la degradación con altas tasas de residencia (Primavesi, 2002). En climas cálidos y húmedos, predominantes en las regiones tropicales, la mineralización es más rápida y el tiempo de residencia del carbono en el suelo es bajo, con tiempos de vida media en el suelo menores a 100 años (Ross *et al* 2003; Tiessen *et al.*, 2003, Schwendenmann & Pendall, 2006). El contenido de MO es dinámico y refleja la historia del balance entre las tasas de acumulación y de mineralización, es afectado por las labranzas, la secuencia de cultivos y la fertilización (aporte de carbono de los residuos) (Janzen, 2006).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) recomendó que el stock de carbono del suelo se mida hasta los 0,30 m como estándar. Sin embargo, la Dap cambia a menudo con el uso del suelo y el COS por unidad de área de suelo a una profundidad fija así también cambiará, incluso sin ningún cambio en la fracción de masa de COS seco. La relación de estratificación de la materia orgánica es un proceso común en ecosistemas naturales (Franzluebbers, 2002), siendo ésta definida como la relación entre el contenido porcentual del COS entre la capa superficial y una capa de suelo subsiguiente, que puede ser hasta donde el suelo es afectado por una labranza. Valores altos en esta relación indicarían buena calidad del suelo, y estaría relacionado a suelos con manejos pocos agresivos.

El COS afecta a varias propiedades físicas, por ejemplo a mayor nivel de COS más estables son los agregados del suelo. Ésta relación entre COS y propiedades físicas fue probada por varios investigadores en zonas templadas del país (Tallarico & Caravello, 1964; Studdert *et al*, 1997; Diaz-Zorita y Grosso, 2000) y del exterior (Tisdall & Oades, 1982). Sin embargo, en zonas tropicales la presencia de otros agentes cementantes como las asociaciones con oxihidróxidos de Fe y Al (Rojas, 1997) puede hacer enmascarar los efectos o las relaciones entre el COS y las propiedades físicas del suelo, quedando poco clara la influencia del COS en el funcionamiento estructural del suelo.

3.3 Propiedades edáficas, indicadores de calidad de suelo.

Una buena calidad física del suelo determina un ambiente favorable para el desarrollo de las raíces, adecuada capacidad para amortiguar déficit hídrico y, una alta resistencia a la degradación por acción de agentes externos. La calidad física del suelo está

determinada genéticamente (calidad intrínseca), y a su vez es modificada por el manejo antrópico (calidad dinámica o salud del suelo) (Taboada & Álvarez, 2008).

El ingreso del agua al suelo depende de la presencia de agregados superficiales estables y de la cobertura superficial del terreno, para que no se rompan cuando reciban el impacto de las gotas de agua lluvia. Ambas características propician el ingreso del agua al suelo mediante el proceso de la infiltración, el que es afectado negativamente por la destrucción de la estructura superficial del terreno por exceso de labranza (Amézquita, 1998).

La ausencia de laboreo, o labranza cero o siembra directa (SD) tiende a incrementar los niveles de COS superficiales, fenómeno conocido como estratificación por acumulación superficial de residuos de cultivos. En efecto, esto fue hallado tanto en la región semiárida pampeana, donde se encontraron mayores niveles de carbono orgánico bajo SD que las que poseían labranza convencional después de 4 años de SD (Bono *et al.*, 2008), lo mismo ocurrió en la región de la Pampa Ondulada (Álvarez *et al.*, 2009).

Diversos investigadores han hecho esfuerzos en seleccionar atributos de suelo que permitan de una manera directa evaluar la calidad del mismo y relacionar esto con la productividad y sostenibilidad del sistema (Bouma 1989; Arshad & Coen, 1992; Larson & Pierce, 1994; Doran & Jones, 1996; Hartemik, 1998; Etchevers, 1999). Sin embargo la información es escasa en zonas tropicales de Argentina.

La densidad aparente (Dap) del suelo es utilizada para la estimación de calidad de la estructura en relación al potencial de lixiviación, la productividad y la resistencia a la erosión. La Dap es afectada por varios factores, como ser el sistema de manejo, el tipo de cobertura vegetal, la cantidad de residuos en superficie y el tenor de materia orgánica (Cruz *et al.*, 2003; Tormena *et al.*, 2004; Assis & Lanças, 2005). La compactación disminuye el volumen de poros, modifica la estructura porosa y aumenta la Dap (Baver *et al.*, 1991). Así mismo, la degradación de la estructura del suelo por compactación provoca una ralentización o paralización del desarrollo de las raíces, al aumentar la resistencia mecánica (RM) (Bengough, 1991; Atwell, 1993). Los valores críticos RMP son variables y dependen del tipo de planta y de las características y propiedades del medio edáfico (Bengough, 1991). Según varios autores con valores de resistencia a mecánica superior a 2 MPa se reduce significativamente el crecimiento de las raíces (Graecen, 1986; Bengough 1991; Atwell 1993).

La mayor cantidad de información sobre efectos de las labranzas, o de la ausencia de ellas, proviene de las zonas templadas. Por ejemplo, trabajando con dos suelos de diferente textura (franco arenoso y franco arcillo limoso) en la Pampa Húmeda Taboada *et al.* (1998), encontraron incrementos de la resistencia a la penetración en la superficie del suelo después de 4 años de SD. En un Argiudol petrocálcico, Fabrizzi *et al.* (2005), encontraron mayores valores de densidad aparente bajo SD que bajo labranza mínima en diferentes profundidades hasta unos 20 cm.

4. Estado de la investigación en suelos rojos.

En países con suelos y agro-ecosistemas tropicales como Nigeria, la erosión de suelo es generalizada y fue reconocida como un problema grave ya hace mucho tiempo (Stam 1938), el 26,3% del área de estudio tiene una pérdida severa de suelo y el 27,9% muy severa (FAO 2005), la baja producción agrícola, la inseguridad alimentaria, los bajos ingresos de la población rural y la pobreza son algunas consecuencias de la erosión del suelo. En cafetales de Kenya la erosión de suelo es un problema serio donde se llevan a cabo prácticas de labranza y donde se aplican controles químicos de malezas (Pereira *et al.*, 1964). En estos sistemas la labranza continuada produjo efectos adversos, lo que incluyó una reducción del espacio de poros y de velocidad de percolación del agua (Pereira & Jones, 1954a). En cambio, la utilización de diferentes aperos para el control mecanizado de malezas, tales como la rastra de discos, cultivadores y arado multi-surcos fueron efectivos en el control de malezas en el cafetal, sin haber diferencias de rendimiento entre ellos (Pereira y Jones 1954b).

En el SE de Brasil, el tránsito de las maquinarias, el uso de arados y rastras a la misma profundidad y en forma continuada, determina la formación de una capa compacta sub-superficial conocida como piso de arado a 20-25 cm o 10-12 cm de profundidad, esto tiene efectos perniciosos sobre el desarrollo del sistema radical de las plantas, la disponibilidad de oxígeno y el movimiento del agua en el suelo (Freitas, 2000). En Ultisoles de Venezuela, suelos tratados continuamente bajo la forma convencional (cuatro pasadas de gradas de discos cada año) tuvieron menor porcentaje de macro-agregados estables y, en consecuencia una mayor tendencia a la auto compactación superficial en comparación a las áreas tratadas con siembra directa o la sabana no labrada, afectando negativamente el objetivo de crear una mayor aireación en el suelo con la labranza (Hernández, 2000). Se halló que la cantidad de agregados estables al agua ($> 0,25$ mm) se incrementa con el incremento del carbono orgánico en el suelo y disminuye con el incremento de la energía de rotura de los agregados (Watts y Dexter, 1997).

En la región de estudio, los resultados de las investigaciones realizadas son contradictorias, Fernández *et al.* (2010), investigando sobre diferentes modalidades de manejo de residuos de cosecha en el sector forestal, no encontró diferencias en los contenidos de carbono orgánico, N, P y bases de cambio en profundidades de 0-10, 10-30 y 30-60 cm. En el mismo ensayo y manejos de suelo Von Wallis & Taboada (2014) concluyeron que la técnica de preparación del terreno forestal afectó solamente algunas de las variables analizadas entre ellas el stock de carbono, pero no llegó a afectar a las propiedades físicas como la estabilidad de agregados, tasa de infiltración y la densidad aparente. Sin Embargo Lupi *et al.* (2002), encontraron en la misma región, que la estabilidad de agregados fue afectada en forma negativa cuando se los somete a manejos intensivos de preparación del suelo, con pérdida de macro-agregados estables lo cual se asocia a caída de COS.

En ensayos sobre diferentes sistemas de manejo de suelo en YM en el noreste de Corrientes, la velocidad de infiltración y la estabilidad de agregados fue superior en los tratamientos de labranza cero respecto a los sistemas tradicionales evaluados Venialgo *et al.* (2002 y 2003).

Los suelos con plantaciones de YM en la Provincia de Misiones han sido relativamente poco estudiados. Entre los antecedentes se encuentran los trabajos de Piccolo

(1996), quien cuantificó la concentración y acumulación de COS en ecosistemas vírgenes (selva), en una parcela de yerba mate consociada con pasto elefante (*Pennisetum purpureum* Schumacher) y una parcela sin consociar. Este autor concluyó que los agregados de un suelo Kandihumult (0-0,05 m) eran estables y presentan una distribución característica, con una mayor proporción acumulada como macro-agregados, con un pequeño remanente como micro-agregados. Estos micro-agregados son muy estables ante la acción desestabilizante del laboreo y además, son los que poseen mayor concentración de COS en todos los sistemas evaluados. Sin embargo, la rotura o desestabilización de los macro-agregados se piensa que se produce por una acción mecánica (laboreo) y no por pérdidas del COS. Esto difiere de lo encontrado por Lupi *et al.*, (2002), en plantaciones de Pino, trabajo en el cual se relacionó la pérdida de macro-agregados con una caída en los niveles de COS. Cabe preguntarse entonces sí, ¿Cuánto afecta a la calidad del suelo el cambio de uso de selva nativa a plantaciones de YM.?

La gran cantidad de macro-agregados encontrados, independientemente del manejo aplicado en diferentes ensayos realizados en suelos ferralíticos, son atribuidos a la muy buena estructuración natural, debido principalmente a la acción y asociación de los oxihidróxidos de Fe y Al y a la materia orgánica (Deshpande *et al.* 1968, Oades 1993, Rojas 1997). Esto lleva a preguntarse, ¿qué grado de influencia tiene el COS sobre la calidad estructural del perfil en los suelos con uso yerbatero?

Para evaluar el impacto de los sistemas de labranza en suelos tropicales se utilizan diferentes indicadores. Por ejemplo, Moreno Álvarez (2002), halló que: a) el contenido de materia orgánica en la capa arable, no debería ser menor de 70 % respecto de las condiciones vírgenes, b) el porcentaje de agregados hidroestables ($> 0,25$ mm) no menor que 60 %, c) el coeficiente de infiltración en la primera hora de observación, no menor de 50 mm h^{-1} . Según estudios de diferentes sistemas de labranza en suelos rojos de Brasil, la infiltración fue el parámetro que demostró una diferencia entre los sistemas de preparación de suelos (Araujo *et al.*, 2002). Este autor informa valores de infiltración más altos con el uso de escarificadores ($283,9 \text{ mm/h}$), en comparación con la siembra directa ($182,7 \text{ mm h}^{-1}$) o el uso de arados de discos ($177,6 \text{ mm h}^{-1}$) y azadas rotativas ($179,1 \text{ mm h}^{-1}$).

Sá & Lal (2009), indicaron que la relación de estratificación pudo ser usada como un indicador de secuestro de carbono en un Oxisol de Brasil. El agregado de residuos orgánicos en suelos ferralíticos en plantaciones de citrus afectó al COS, la materia orgánica particulada y el nitrógeno total, por lo que serían indicadores sensibles de la calidad del suelo Dalurzo *et al.*, (2005). Von Wallis & Taboada (2014), Cuando compararon los distintos manejos de residuos en plantaciones de Pino, prácticamente no hallaron diferencias entre las propiedades físicas del suelo al cuarto año de establecida la plantación entre los manejos, sin embargo si hallaron posibles indicadores del cambio de uso de selva nativa a forestal. ¿En suelos con uso yerbatero se podrá obtener un conjunto mínimo de datos para diferenciar los manejos y su calidad estructural?

Pese a que existen algunos antecedentes realizados sobre calidad de suelo en Ultisoles, muy pocos investigadores han abordado el estudio de los sistemas de labranzas tradicionales de uso actual en el cultivo de YM (rastra, herbicida y desmalezado mecánico) y su relación con la calidad estructural, su impacto en propiedades físicas, como la estabilidad de agregados la densidad aparente, la infiltración, la resistencia mecánica, la porosidad y la relación de éstos con los contenidos de COS. Por otra parte, la obtención de resultados originales en suelos subtropicales puede contribuir a paliar la escasez de indicadores confiables de calidad de suelos en estas regiones.

5. Objetivos.

Este trabajo de tesis tiene como objetivo general evaluar el estado de degradación de suelos Ultisoles bajo diferentes sistemas de control de malezas en cultivos de YM en Misiones. La hipótesis de trabajo es que la pérdida de COS motorizadas por el cambio en el uso del suelo de Selva Nativa a agricultura con sistemas de control de malezas basados en laboreo influye negativamente en la calidad de la estructura de los suelos Yerbateros. Esta degradación es menor cuando se elimina el laboreo en el control de malezas. Este patrón de cambios se asemeja al comportamiento usual de los suelos templados, y se diferencia de la supuesta mayor resistencia a la degradación de los suelos ferralíticos.

Para obtener resultados y conclusiones del objetivo principal y aprovechar al máximo la información generada se creyó conveniente abordar la temática por medio de tres objetivos parciales a saber:

1. Evaluación de sistemas de control de malezas en YM.

Objetivo: Identificar las mejores estrategias de manejo del suelo para controlar las malezas, de forma de minimizar ulteriores pérdidas de calidad de suelo respecto a la selva tropical.

Hipótesis: Los métodos de control de malezas que no producen remoción de suelo, son los más apropiados para mitigar la pérdida de calidad respecto a la selva subtropical.

2. Relación entre el COS y Propiedades físicas.

Objetivo: Analizar cuál es la relación entre el COS y la calidad de la estructura de los Ultisoles en Misiones.

Hipótesis: La calidad de la estructura de los Ultisoles Misioneros, medida a través de diferentes parámetros (e.g. estabilidad estructural, tasa de infiltración, densidad aparente) guarda un cierto grado de relación con el contenido de COS, sin embargo, esta relación dependerá de la propiedad física con la que se relacione.

3. Indicadores de calidad de suelo.

Objetivo: Establecer un conjunto mínimo de indicadores de calidad física de suelo, que sean suficientemente sensibles para distinguir distintos manejos implementados en YM.

Hipótesis: el CMD va a estar integrado por aquellas propiedades que mostraron valores diferentes entre manejos con remoción de suelo y sin remoción utilizados en el capítulo III de esta tesis.

Capítulo II. Materiales y métodos generales.

1. Organización de la tesis.

Esta tesis está organizada en siete capítulos, los mismos abordan las siguientes temáticas:

En el **Capítulo I** se realizó una introducción general al problema tratado en la tesis, se describieron los antecedentes y estados de la investigación y se expuso el objetivo general de esta tesis. Para abordar el objetivo general y poner a prueba la hipótesis de trabajo se planteó tres objetivos parciales, cada objetivo parcial se desarrolló por capítulo.

En el **Capítulo II** se explica sobre cómo está organizada esta tesis, para luego continuar con lo referente a materiales y métodos aplicables a todos los capítulos. Se describió los criterios para la selección de los sitios de muestreos, como así también las localidades donde se han muestreado. Se describen las metodologías de las propiedades físicas medidas a campo y los análisis en laboratorio. En éste capítulo se detalla la conformación de dos set de muestras para trabajar con los objetivos. También se describen los diseños y análisis estadísticos empleados.

Los capítulos **III, IV y V** se corresponden a uno por cada objetivo secundario (1, 2 y 3 de este capítulo). Cada capítulo consta de una introducción, revisión de antecedentes, materiales y métodos como también objetivos específicos del capítulo. Se presentan los resultados, discusiones y conclusiones del capítulo.

En el **capítulo VI** se informó las conclusiones del trabajo. Además de las conclusiones basadas en cálculos estadísticos e hipótesis, también se comentan las recomendaciones agronómicas que se obtuvieron en el desarrollo de esta tesis.

En el **capítulo VII** se expone el listado de bibliografías utilizadas para el desarrollo de este trabajo de tesis.

2. Sitios de muestreo.

Para poner a prueba las hipótesis planteadas en esta tesis, se seleccionaron en total 47 parcelas de muestreo. De éstas, 10 corresponden a la situación prístina de Selva y 37 a yerbales con diferentes manejos de suelo para el control de las malezas. Las parcelas de muestreo se distribuyen en la zona rural de las siguientes localidades de Misiones:

Tabla 1. Ubicación de parcelas por localidad.

Localidad	N° Parcela	Latitud	Longitud
Apóstoles	1	28° 0'14.72"S	55°43'4.16"O
	2	28° 1'24.11"S	55°42'34.38"O
	3	28° 2'8.65"S	55°37'27.42"O
	4	28° 1'46.83"S	55°37'5.03"O
L.N.Alem	5	27°38'28.06"S	55°16'10.19"O

	6	27°36'54.81"S	55°15'34.05"O
	7	27°36'56.18"S	55°15'38.56"O
Oberá	8	27°31'31.77"S	55° 5'44.65"O
	9	27°31'16.14"S	55° 6'1.15"O
	10	27°31'30.55"S	55° 5'41.40"O
	11	27°39'24.46"S	55° 1'44.66"O
	12	27°34'0.06"S	55° 4'33.50"O
Campo Grande	13	27°18'31.14"S	55° 3'24.32"O
	14	27°18'19.66"S	55° 3'24.41"O
	15	27°12'13.68"S	54°57'33.89"O
Aristóbulo del Valle	16	27° 7'3.58"S	54°51'27.02"O
	17	27° 7'7.55"S	54°52'5.24"O
San Vicente	18	27° 1'35.11"S	54°32'20.96"O
	19	27° 2'7.77"S	54°30'59.60"O
San Pedro	20	26°38'11.38"S	54° 8'46.90"O
	21	26°40'9.48"S	54° 8'55.91"O
Santo Pipó	22	27° 8'32.47"S	55°23'47.89"O
	23	27° 7'22.49"S	55°25'22.84"O
	24	27° 7'25.46"S	55°25'25.30"O
	25	27° 5'53.22"S	55°22'19.74"O
Puerto Rico	26	26°52'47.45"S	55° 2'14.70"O
	27	26°50'29.41"S	55° 3'40.28"O
	28	26°53'20.49"S	54°57'50.24"O
Jardín América	29	27° 2'4.97"S	55°12'12.88"O
	30	27° 5'29.75"S	55° 9'51.18"O
	31	27° 4'2.73"S	55°15'0.57"O
San Vicente	32	27° 1'30.18"S	54°32'49.86"O
	33	27° 4'16.62"S	54°24'46.04"O
	34	27° 1'42.72"S	54°32'44.31"O
	35	27° 2'28.43"S	54°32'8.93"O
	36	27° 3'15.49"S	54°30'3.66"O
	37	27° 3'17.41"S	54°30'15.06"O
	38	27° 0'41.14"S	54°31'37.74"O
	39	27° 0'48.09"S	54°30'42.01"O
	40	27° 1'40.08"S	54°32'18.60"O
	41	27° 1'29.95"S	54°32'55.40"O
	42	27° 4'16.62"S	54°25'5.26"O
	43	27° 1'35.22"S	54°32'29.55"O
	44	27° 2'32.60"S	54°32'7.82"O

	45	27° 3'11.71"S	54°30'8.27"O
	46	27° 0'34.81"S	54°31'38.00"O
	47	27° 0'54.76"S	54°30'44.23"O

Para la selección de los sitios a muestrear como primer medida se seleccionaron posibles parcelas de YM con la ayuda del Google Earth, donde se eligieron parcelas por su accesibilidad, y cobertura de suelo o indicios de prácticas de manejo de suelo agresivas, estos últimos dos datos hacía suponer una posible variabilidad en los contenidos de COS. Además de esta primer selección con soporte informático, se realizaron recorridas a campo en cada zona con los extensionistas del INTA o profesionales privados de cada sitio a muestrear, que ayudaron a localizar parcelas de alto y bajo COS, y sobre todo para conformar el grupo 1 de parcelas donde se necesitó tener certeza del historial del sistema de cultivo.

El grupo 1, involucra a 16 parcelas (desde la 32 hasta la parcela 47). La selección de estas parcelas fue con el objeto de contar con tres sistemas de control de malezas diferentes y tener la certeza de que hayan sido empleados para el control de las malezas por lo menos desde hace 15 años. Además cada parcela con YM cuenta con su par de selva para su comparación. Este grupo se utilizó para probar la hipótesis 1 sobre “Evaluación de sistemas de control de malezas en YM”. Este grupo de parcelas se encuentra localizado en la zona rural de la localidad de San Vicente en el centro de la provincia sobre ruta nacional 14.

El grupo 2, involucra al total de las 47 parcelas. En este caso las parcelas de muestreo fueron seleccionadas desde la zona sur hasta la zona centro- norte de la provincia, abarcando la mayor área productora de YM. La selección de los lotes fue con el objeto de buscar variabilidad en los contenidos de COS para así poner a prueba la hipótesis 2 sobre la “Relación del COS y las propiedades Físicas”. No se tiene certeza absoluta del manejo histórico de los suelos de cada punto, pero sí en cambio (por experiencia agronómica e información local) de la “Intensidad de remoción y calidad cualitativas” (explicados en el Capítulo IV) que se usaron para estimar el posible nivel de COS (alto, medio, bajo) de esas parcelas y así asegurar la variabilidad de los muestreos. Las parcelas se distribuyen desde el sur hasta el centro–norte de la provincia por rutas nacionales, 14 y 12.

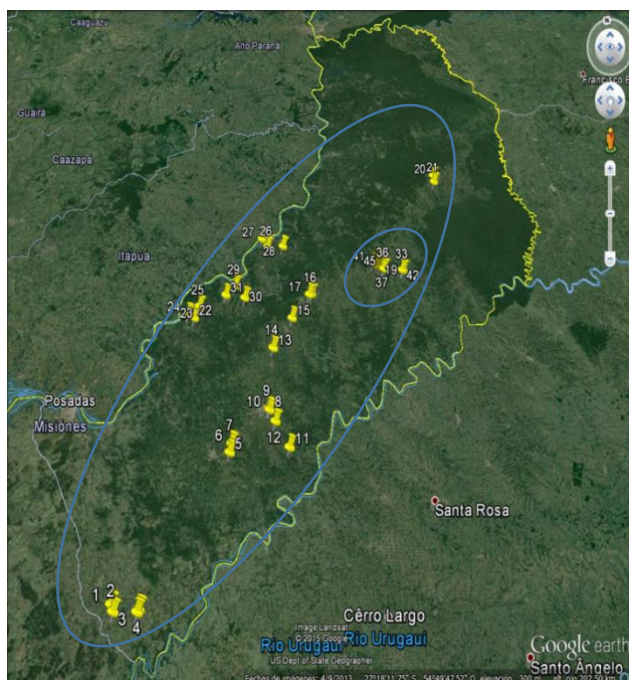


Figura 1. Zona de muestreo. El círculo chico indica el grupo 1, el círculo grande más círculo chico grupo 2.

3. Muestreos a campo y metodologías empleadas.

Las profundidades de muestreos, número de submuestras y determinaciones específicos de cada objetivo están detalladas en los capítulos respectivos. A continuación se detallan los indicadores muestreados en las parcelas de YM, sobre los entre líneas y en la parte central de la parcela dejando un espacio considerando bordura.



Figura 2. Entre lineo de una plantación de YM.

Los indicadores utilizados se describen a continuación:

- a) **Carbono orgánico del suelo (COS):** La muestra extraída a campo fue secada y tamizada por tamiz de 0,5 mm según la norma IRAM-SAGPyA 29578. En laboratorio se procedió a aplicar el método de combustión húmeda propuesto por Walkley y Black (1934). En este método el carbono orgánico se oxida parcialmente por una solución de bicromato de potasio en medio ácido. El agregado de ácido sulfúrico aporta el medio para la reacción y el calor necesario para que se produzca la oxidación del carbono. El exceso de bicromato se valora mediante volumetría de óxido reducción con una solución ferrosa (IRAM-SAGyP 29571-2). Los valores están expresados en gramos por kilogramos de suelo seco y hace referencia al carbono fácilmente oxidable.
- b) **Densidad aparente (Dap):** Se empleó el método del cilindro, consistió en introducir un cilindro biselado de volumen conocido en el suelo, enrasando el suelo con los bordes, secar la muestra en estufa a 105° C hasta peso constante y obtener su valor de la siguiente manera:

$$\text{Dap [Mg m}^{-3}\text{]} = \text{peso del suelo seco (Mg)} / \text{volumen del cilindro (m}^3\text{)}$$

Los valores de Dap en esta tesis están expresados en Mg m^{-3} .

- c) **Stock de Carbono del suelo:** para llevar los valores de COS a unidades de stock de C, es necesario corregir por la densidad aparente (Dap), el espesor y la superficie de cada capa. Así para 1 ha, el stock de C se calcula:

$$\text{Stock C}_i [\text{Mg ha}^{-1}] = \text{COS}_i [\text{g kg}^{-1}] \times 10.000 \text{ m}^2 \times \text{espesor}_i [\text{m}] \times \text{Dap}_i [\text{Mg m}^{-3}] \times 0.1$$

Siendo posible así conocer el stock de C de un perfil o de varias capas de suelo (i hasta j), simplemente sumando los stocks individuales de cada capa expresados en unidades de masa:

$$\text{Stock C suelo [Mg ha}^{-1}] = \Sigma \text{ Stock C}_{ij} [\text{Mg ha}^{-1}]$$

- d) **Cambio del diámetro medio ponderado como medida de la estabilidad de agregados (CDMP):** propuesto por De Boodt & DeLeehneer (1961). Las muestras extraídas a campo se tamizan por un tamiz de 8 mm para luego ser secadas a la sombra. Luego de esto se procede al tamizado en seco por una batería de tamices. Se toman cantidades proporcionales de cada fracción, de tal manera que la suma totalice 100 gramos, luego se humedecen por goteo y se incuban. Se colocan en los tamices correspondientes y se someten al tamizado húmedo, determinando la cantidad presente en cada tamiz. Cuanto menor sea la variación del diámetro ponderado entre el tamizado seco y húmedo mayor será la estabilidad estructural. Esta expresado en milímetros cuanto menor es el valor, mayor es la estabilidad.
- e) **Resistencia mecánica a la penetración (RMP):** Se utilizó un penetrómetro de impacto de punta cónica. Este es un penetrómetro dinámico con un eje que finaliza

en una punta cónica de 30°, en el extremo superior de este eje corre libremente una pesa que por caída libre impacta penetrando de esta forma la punta del eje. Cada impacto se registra en una regla puesta en paralelo al eje. Con la siguiente fórmula se calcula el Índice de Cono (IC) que da idea de la RMP.

$$IC = \frac{N^{\circ} \text{ de golpes} \times F}{\text{Espesor} \times \text{área del cono}} \quad IC = \frac{N^{\circ} \text{ de golpes} \times Kg}{cm^2}$$

F= Fuerza con que se opone el suelo a la penetración del vástago con punta cónica. Los valores en esta tesis están expresados en MegaPascales (MPa).

- f) Tasa de Infiltración (TI): Se utilizó el método propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1999). Consiste en el uso de cilindros simples que son enterrados 3 pulgadas en el suelo, dentro de ellos se aplica dos láminas de agua de 25 mm, en distintos momentos. La primera lámina es para homogeneizar la humedad del suelo y la segunda lámina es de lectura del tiempo de infiltración, luego estos resultados son pasados por regla de tres simple a $mm \text{ min}^{-1}$.
- g) Cobertura de suelo (% Cob): Se midió el porcentaje de cobertura de suelo con el método de la sogá. Consiste en una sogá de diez metros con marcas cada diez centímetros, que se extiende sobre la superficie a medir, luego se cuenta las marcas que tocan la cobertura. Al haber 100 marcas en total el número de marcas se expresa directamente en porcentaje.
- h) Humedad edáfica (H°): Las muestras extraídas del campo se guardan en una bolsa hermética para que no pierda humedad, luego en laboratorio se pesa en húmedo luego se coloca la muestra en estufa a 110 grados centígrados hasta peso constante, aproximadamente 24 horas y se pesa nuevamente. El porcentaje de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$H^{\circ} \text{ suelo} = 100 \times (\text{Peso Húmedo} - \text{Peso seco}) / \text{Peso seco}$$

- i) Porosidad Total (PT): para el cálculo se aplicó la siguiente fórmula

$$PT (\%) = [1 - (D_{ap} / D_{part})] \times 100$$

D_{part} = densidad de partícula, se consideró el valor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$

4. Diseño y análisis estadístico.

En el objetivo 1 (capítulo III) el diseño estadístico fue de bloques con parcelas al azar. Para evaluar la calidad del suelo entre los tres sistemas de control de malezas, se utilizó el análisis de la varianza y comparación de medias aplicando el test de la DMS propuesto por Tukey al 0,05%. Como medida de variabilidad se utilizó el error estándar (EE). Para evaluar la pérdida de calidad de suelo respecto a la situación prístina (selva) el análisis estadístico consistió en una prueba “t” para muestreos apareados con significancia al 0,05 %. Se conformaron tres parcelas apareadas o pares, por cada sistema de control de malezas. La variable de apareo es el suelo, considerando que ambas parcelas parten del mismo tipo de suelo. Como medida de variabilidad se utilizó el desvío estándar de la diferencia. El programa estadístico utilizado fue InfoStat-Statistical Software, versión libre.

En el objetivo 2 (capítulo IV), se trabajó con análisis de regresión simple. Las variables dependientes fueron las propiedades físicas medidas y la variable regresora o independiente fue el COS. Como medida de ajuste se utilizó el coeficiente de determinación R^2 , mide la proporción de la variación en “y” que es explicada por la relación con “x”. Para las diferencias significativas se utilizó el valor de F y además el coeficiente de correlación de la regresión. El programa utilizado fue Statgraphic XVII-X64.

En el objetivo 3 (capítulo V), se hizo análisis multivariado, donde se empleó el análisis de componentes principales (ACP). Se empleó los gráficos Biplot para una mejor visualización de los resultados. El programa estadístico utilizado fue InfoStat-Statistical Software.

Capítulo III.

Evaluación de sistemas de control de malezas en YM.

1. Introducción.

La elección del modo de manejar los suelos y las malezas repercuten en las propiedades y funciones que el mismo brinda al agro-ecosistema. La labranza aumenta la mineralización del COS incorporando residuos de cultivos, favoreciendo la actividad de los microorganismos (Gregorich & Jansen., 1996). Diversos autores, comparando labranza cero versus labranza convencional, concluyen que la labranza cero presenta ventajas en el COS debido a que la labranza convencional incorpora la materia orgánica de los residuos superficiales, físicamente rompe los agregados y expone el COS encapsulado aumentando las condiciones de mineralización (Six *et al.*, 1999; Bono *et al.*, 2008; White & Rice 2009, Lal, 2004). El modelo conceptual desarrollado por Tisdall & Oades (1982) propone la existencia de dos tipos de agregados: micro y macroagregados (de acuerdo a su diámetro menor o mayor de 250 μm , respectivamente), y sugiere que la estabilidad de la estructura depende en gran parte de los microagregados del suelo por ser estos más estables al humedecimiento y a los esfuerzos mecánicos, no ser susceptibles a las prácticas de manejo y además son los que integran en conjunto a los macroagregados.

El estudio de los cambios en las propiedades y su efecto sobre la productividad de los agroecosistemas puede hacerse observando la evolución en el tiempo de éstos, teniendo como referencia al ecosistema natural (Medina Méndez *et al.*, 2006). Cuando se evalúan propiedades del suelo, se compara con suelos prístinos ya que pueden ser considerados como un punto de referencia del sistema edáfico, porque las condiciones naturales del ambiente se han encontrado poco modificadas en el tiempo respecto del uso (Sacchi & De Pauli 2002). Además de diagnosticar el estado actual de la estructura de los suelos bajo diferentes manejos de malezas es también interesante comparar estas situaciones con las estructuras del suelo en estado prístino en la selva nativa para considerar sus efectos a largo plazo y realizar planificaciones de manejo conservacionista acorde al paisaje evaluado.

Los manejos de suelos que producen densificación mostrarán una masa de suelo más alta, y por ende mayor acumulación de carbono en peso (Veldkamp, 1994, Sisti *et al.*, 2004). La falta de consideración por masa equivalente de suelo en las comparaciones, erróneamente podría favorecer aquellos tratamientos que muestran un aumento de la densidad aparente mediante la inclusión de más suelo en la muestra (por lo tanto más COS) dentro de la misma profundidad (Vanden Bygaart & Angers, 2006).

1.1 Antecedentes específicos.

En el SE de Brasil, el tránsito de las maquinarias, el uso de arados y rastras a la misma profundidad y en forma continuada, determinan la formación de una capa compacta sub-superficial conocida como piso de arado a 20-25 cm o 10-12 cm de profundidad (Freitas, 2000). Hernández (2000), estudió varios sistemas de manejo de Ultisoles de Venezuela, obteniendo como resultado que el suelo tratado continuamente bajo la forma

convencional (cuatro pasadas de rastra de discos cada año) tuvo menor porcentaje de macroagregados estables y en consecuencia una mayor tendencia a la auto compactación superficial, que las áreas tratadas con siembra directa o la sabana no labrada, por lo cual el objetivo de crear una mayor aireación en el suelo con la labranza se pierde rápidamente al humedecerse el mismo.

En ensayos sobre diferentes sistemas de manejo de suelo en YM en Ultisoles del noreste de Corrientes, Venialgo *et al.* (2003), no encontraron para la estabilidad de agregados del suelo, diferencias estadísticas en los tres años de muestreo.

1.2 Estado del arte sobre manejos de Ultisoles en Misiones.

En cultivos perennes como la YM, las labranzas se realizan solo para controlar a las malezas, la preparación de la cama de siembra deja de ser prioritario. Los sistemas de manejo de suelo tienen que promover la infiltración de agua de lluvia, además de controlar a las malezas. La adopción de tecnologías inapropiadas para estos suelos y la falta de información sobre los efectos de sistemas más conservadores de la calidad del suelo retrasan la adopción por los productores.

En suelos lateríticos de diferentes agro-ecosistemas de Misiones, Píccoli *et al.* (1997), concluye que la gran estabilidad natural de los agregados contuvo los procesos de desagregación, siendo notable el bajo porcentaje micro-agregados. El cambio de uso del suelo en Ultisoles produce diferencias en la estabilidad de la estructura, siguiendo el orden de estabilidad Selva Nativa, Yerba Mate, Té, Forestación de Pino (Barbaro *et al.*, 2014). Sin embargo la inestabilidad de los suelos bajo estos cultivos no llega a valores limitantes para el desarrollo. En Ultisoles de la Provincia de Misiones y Noreste de Corrientes, los sistemas conservacionistas promueven un mejor desarrollo de la macro-porosidad, porosidad total y disminuye la densidad aparente del suelo (Barbaro & Sosa 2014). Sin embargo el agua útil del suelo no presentó diferencias entre los sistemas conservacionistas y tradicionales (Barbaro & Sosa 2011).

Investigaciones realizadas por Fernández *et al.* (2010), sobre diferentes modalidades de manejo de residuos de cosecha en el sector forestal, no encontraron diferencias en los contenidos de COS, N, P y bases de cambio en profundidades de 0-10, 10-30 y 30-60 cm. Von Wallis (2013), no encontró diferencias significativas en las propiedades físicas evaluadas en el manejo de suelo para la plantación forestal. En cambio, Lupi *et al.* (2002), encontraron que la estabilidad de agregados fue afectada en forma negativa cuando los suelos son sometidos a manejos intensivos de preparación del suelo en plantaciones de Pino. Barbaro *et al.* (2014), encontraron que el cambio en el uso del suelo de selva a usos como té, pino y YM, afectan la estabilidad estructural (CDMP) y además que los sistemas de labranzas tradicionales en YM aumentan la densidad aparente de los suelos afectando la porosidad total y macro poros (Barbaro & Sosa 2014), pero no encontró diferencias en las constantes hídricas del suelo entre manejos conservacionistas y tradicionales en YM (Barbaro & Sosa 2011).

Respecto a la calidad del suelo medida a través del contenido de COS las interpretaciones pueden variar dependiendo de la metodología de medición del stock de carbono, para ello Toledo, *et al.* (2013) examinaron una serie de métodos de cálculo del stock de carbono (SC) para evaluar mejor los efectos de los cambios de uso del suelo en

Oxisoles en diferentes agroecosistemas. Esos métodos incluyeron mediciones directas como la concentraciones de carbono (CC), métodos tradicionales como las mediciones a espesores fijos (EF) y también otros para intentar reducir errores efectuados por cambios en la Dap, como el de masa original del suelo equivalente (ESMO), espesor de suelo equivalente (ESE), la masa de suelo equivalente (ESM), la masa fija de 2500 mg de suelo (FM2500), masa acumulativa en sistema de coordenada (CMC), sistema de material de coordenadas (SMC). Concluyeron que los métodos de ESE y el SMC son los más apropiados para la estimación del SC ya que en el primer caso, no está influenciado por los cambios de Dap., y en el segundo caso, es más sensible a la forma de manejo que al cambio de agroecosistema.

Las investigaciones en suelos de ambientes subtropicales y tropicales en Argentina son escasas. Estos ambientes que están comenzando a ser utilizados para la agricultura extensiva con las mismas prácticas de manejo de suelo que en ambientes templados, corren serio riesgo de degradación.

2. Objetivos e hipótesis general

El objetivo de este capítulo fue evaluar el impacto de diferentes manejos sobre el COS y los parámetros físicos desde la superficie hasta 1 m de profundidad de suelo. En función de ello, identificar las mejores estrategias de manejo del suelo para controlar las malezas, de forma de minimizar ulteriores pérdidas de calidad de suelo respecto a la selva nativa.

La hipótesis de trabajo es sostener que los métodos de control de malezas que no producen remoción de suelo, son los más apropiados para mitigar la pérdida de calidad respecto a la selva subtropical.

2.1 Objetivos e hipótesis específica

A) Evaluar el efecto de los diferentes manejos de malezas sobre el COS y la calidad estructural del suelo.

Hipótesis específica: El mantenimiento vivo de las malezas de manera controlada genera mayores ingresos de carbono al suelo y mejora las propiedades físicas del perfil.

B) Evaluar los cambios producidos por los diferentes manejos del suelo en comparación a la situación de selva nativa sobre algunos parámetros estructurales y el COS.

Hipótesis específica: Los manejos de malezas sin remoción de suelo pierden menos COS respecto a las situaciones de selva nativa y en general presentan mejores condiciones estructurales.

3. Materiales y métodos

3.1 Caracterización de sitios

Los sitios de muestreo pertenecen al grupo 1 presentado en el capítulo II punto 2. En este grupo 1 se encuentran identificadas parcelas con manejo de suelo conocido y repetido anualmente por más de 10 años, se localizaron en la zona rural de San Vicente, sobre la RN 14. Los manejos de suelo para control de malezas seleccionados como tratamientos son los siguientes:

- a) Mecánico con remoción de suelo (R): El control de las malezas se realiza con rastras de disco, consiste dos ejes con 5 o 6 cuerpos o discos cada uno. La rastra de disco se pasa en el entre lineo en la época de primavera y verano tres veces al año.



Figura 1. Foto de la remoción de suelo en yerbales a causa del laboreo con rastra de discos.

El control con rastra de discos produce la incorporación de las malezas al suelo, procedimiento en el que se remueve y airea la capa arable mezclándose los restos vegetales de las malezas que son arrancadas desde su raíz. De acuerdo a la intensidad del laboreo pueden transcurrir de tres a cuatro meses para un nuevo control y aporte de MO de los residuos de las malezas. Generalmente el control con rastra se realiza a una altura media de las malezas, entre cincuenta a ochenta centímetros de altura generando en ocasiones un gran volumen de MO.

- b) Mecánico sin remoción de suelo con “macheteadora” (M): El control de malezas se realiza en el entre lineo con una desmalezadora de doble aspas tipo hélice de eje vertical acoplada al tres puntos del tractor. Los macheteos se realizan desde agosto cada 2 o 2.5 meses hasta los primeros días fríos del siguiente año. Totalizando de 3 a 4 pasadas de macheteadora.



Figura 2. Foto del control de mecánico de malezas sin remoción de suelo.

El desmalezado mecánico facilita la descomposición de los residuos vegetales por los microorganismos, debido en la acción de corte de las malezas por las aspás que produce el picado del vegetal (Márquez, 2006). La vegetación espontánea, en su mayoría gramíneas con tasas de crecimiento elevadas gracias a la abundante lluvia, temperatura y luminosidad, aportan gran volumen de MO. Estas especies de malezas poseen meristemas de crecimiento basales a baja altura sobre el suelo, por lo que no son alcanzados por las aspás de la macheteadora, de esta manera se produce el corte del vegetal pero no la muerte de la planta ya que el sistema radical aún sigue vivo. Esto hace que a los dos meses aproximadamente se produzca un nuevo ciclo de control y aporte de MO. El momento en que se produce el control de las malezas con la macheteadora es generalmente con malezas altas (un metro en promedio), aportándose por cada corte gran cantidad de material vegetal.

- c) Químico, herbicida sin remoción de suelo (H): El control de las malezas se realiza con Glifosato, aplicado manualmente con mochila de 20 L de capacidad. Se aplica a la salida del invierno, luego en diciembre. Ocasionalmente si se cosechara en junio se aplica nuevamente en marzo-abril.



Figura 3. Foto del control químico de malezas en la parcela de YM.

El control de malezas con herbicida produce la muerte de toda la planta (parte aérea y radical) y la interrupción de dos meses aproximadamente del crecimiento de nueva vegetación espontánea. Puede transcurrir un período de cuatro a cinco meses desde que hay un nuevo ciclo de control y se produce el aporte de MO. Las recomendaciones técnicas de eficiencia del herbicida hablan de hacer las aplicaciones en estadios tempranos de crecimiento de las malezas, reduciendo ello también el volumen de aporte de material vegetal aportado al suelo (baja altura generalmente no más de treinta centímetros). Existe una tendencia a disminuir el número de especies de malezas producto del uso continuado del herbicida, afectando con el tiempo a la diversidad de nutrientes del suelo, el reciclaje y exploración de raíces.

En las tres formas de control las malezas que se encuentran en el lineo de las plantas de YM son controladas con herbicida o machete en forma manual.

- d) Selva Nativa (S): Son parcelas de selva nativa donde las propiedades de suelo originales están presentes y se utilizan como contraste conformando el par de tratamientos en los respectivos manejos de malezas. En dos situaciones (parcela 43 y 45) se utilizó la misma parcela de selva para más de un par por su cercanía a parcelas con tratamientos diferentes (ver Tabla).

3.2 Determinaciones específicas y profundidades de muestreos.

El manejo de suelo o tratamiento de cada parcela se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1. Parcelas del grupo 1, Granulometría, manejo y parcela con la cual esta apareado el tratamiento.

Parcela	Arena%	Limo%	Arcilla%	Manejo	Par
32	7,3	18,1	74,6	R	41
33	8,2	15,3	76,5	R	42
34	6,8	12,3	80,9	R	43
35	10,4	22,1	67,5	M	44
36	4,9	16,4	78,7	M	45
37	7	16,4	76,7	M	45
38	11	14,3	74,6	H	46
39	8,3	17,2	74,5	H	47
40	5,9	12,3	81,8	H	43
41	9,3	17,1	73,6	S	32
42	7,3	16,5	76,2	S	33
43	9,0	12,3	78,7	S	34-40
44	11,4	20,1	68,5	S	35
45	11	14,3	74,6	S	36-37
46	10	13,3	76,7	S	38
47	9,4	15,1	75,5	S	39

Se extrajeron muestras de cinco espesores (E) de suelo a las siguientes profundidades:

E1 0-0,1 m; E2 0,1-0,2 m; E3 0,2-0,4 m; E4 0,4-0,6 m y E5 0,6-1 m

Se realizó el muestreo en la parte central de las parcelas con tres muestras simples en cada una, para determinar el COS y la Dap en todos los espesores mencionados, CDMP en el E1 y E2, RM en el E1, E2 y E3, TI en el E1 y cobertura en superficie. Las metodologías fueron descriptas en el capítulo II punto 3.

Se calculó el stock de carbono del suelo (SC) cada espesor de suelo, y a partir de la sumatoria, el stock en el perfil del suelo hasta 1 m de profundidad. Las metodologías empleadas para dicho cálculo corresponden a la tradicional, Stock de carbono a espesor fijo (SC EF), determinándose en las mismas profundidades muestreadas para COS y se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$SC\ EF = COS \times Dap \times E \times S$$

E= espesor S= superficie

Y un método para contrarrestar el efecto del cambio de la Dap en los diferentes espesores medidos, se optó por utilizar el método de stock de carbono a espesor de suelo equivalente (SC ESE), determinándose en las mismas profundidades muestreadas para COS y se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$SC\ ESE = COS \times Dap \times Z$$

$$Z = Dap\ suelo\ YM / Dap\ suelo\ Selva \times espesor$$

3.3 Análisis estadístico

Se realizaron dos tipos de análisis estadísticos: para evaluar los diferentes sistemas de manejo de malezas entre sí, “ANOVA” y otro para evaluar los efectos de los sistemas de control de malezas en las propiedades del suelo respecto a la selva nativa, “Test T apareado”. Los mismos fueron explicados en el capítulo II punto 4.

4. Resultados

En la Tabla 2 se observan los resultados del COS en los diferentes espesores estudiados y el SC en sus dos metodologías. En este caso se compararon solamente los tratamientos es decir los sistemas de control de malezas, mediante un ANOVA y comparación de medias aplicando el test de la DMS propuesto por Tukey al $P \leq 0,05\%$.

Tabla 2. Mediciones de la concentración y stock de carbono en suelo. Mediciones de la concentración de carbono orgánico del suelo (el total fue calculado como promedio de los espesores), SC EF stock de carbono en espesor fijo, SC ESE stock de carbono en espesor de suelo equivalente a diferentes profundidades en tres sistemas de control de malezas, H herbicida, M macheteo, R rastra (el total se calculó sumando todos los espesores). EE (error estándar). Letras distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$) DMS Tukey entre sistemas de control de malezas y la letra n indica no significativo.

Espesores	<u>COS g kg⁻¹</u>				<u>SC EF Mg C ha⁻¹</u>				<u>SC ESE Mg C ha⁻¹</u>			
	EE	H	M	R	EE	H	M	R	EE	H	M	R
E1	0,91	14,53b	8,89a	14,72b	0,81	13,41b	17,41a	12,35b	1,03	11,23b	14,89a	8,71b
E2	0,49	10,37a	13,38b	13,39b	0,62	9,45b	13,35a	11,05b	0,48	8,46b	11,58a	9,6b
E3	0,59	7,61n	3,13n	9,0n	0,98	15,73n	17,36n	16,17n	0,92	13,3ab	16,18a	12,89b
E4	0,53	5,88b	7,48ab	7,87a	1,17	11,96n	15,58n	14,42n	0,85	11,4n	14,2n	12,96n
E5	0,50	4,52a	6,77b	6,37b	2,09	19,14b	27,38a	25,61ab	1,87	18,66n	25,08n	23,36n
Total		8,58	11,13	10,27		69,69	91,08	79,6		63,05	81,93	67,52

En el E1 el tratamiento de macheteo presentó valores de COS [g kg⁻¹] significativamente más altos que en los demás tratamientos. En el E2, el macheteo y rastra tuvieron valores de COS significativamente más altos que el herbicida. En el E3 no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, y en el E4 y E5, hubo mayores valores bajo macheteo y rastra que en herbicida con diferencias estadísticas entre macheteo y herbicida, mientras que macheteo presentó un resultado intermedio.

Los valores obtenidos de COS [g kg⁻¹] indican una disminución proporcional desde la superficie hasta la profundidad como ocurre naturalmente, pero que además está en función del uso y manejo del suelo.

Los valores de SC EF [Mg C ha⁻¹] fueron significativamente más altos en el tratamiento macheteo que en el tratamiento de rastra y herbicida en los primeros dos espesores. En los espesores E3 y E4, no se encontraron diferencias estadísticas. En el espesor E5, el macheteo se diferenció estadísticamente del herbicida. En total el SC EF

hasta el metro de profundidad tuvo el siguiente orden M>R>H habiendo una diferencia de más o menos 10 Mg C ha⁻¹ entre el M y la R y de 20 Mg C ha⁻¹ entre el M y el H.

Los valores de SC ESE indican que en E1 y E2 el tratamiento de macheteo presentó valores significativamente más altos que los tratamientos de rastra y herbicida, entre estos últimos no hay diferencias estadísticamente significativas. En E3, el tratamiento de macheteo fue -otra vez- el de mayor valor de SC, en este caso con respecto a la rastra, pero sin diferenciarse estadísticamente del herbicida. En los últimos dos espesores no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. La sumatoria en el perfil del suelo hasta 1 m de profundidad mostró el siguiente orden de SC ESE: M>R>H habiendo una diferencia de más o menos 15 Mg C ha⁻¹ entre el M y la R y de 19 Mg C ha⁻¹ entre el M y el H.

En la tabla 3 se presentan los valores del COS y SC EF para las parcelas de selva que actúan como pares de los tratamientos, esto es parte de la metodología del análisis estadístico del test T.

Tabla 3. Valores de COS g kg⁻¹ y SC EF Mg C ha⁻¹ en las parcelas de selva pares de los tratamientos. S/H= Selva par de Herbicida S/M= Selva par de Macheteo S/R= Selva par de Rastra.

Espesores	COS g kg ⁻¹			SC EF Mg C ha ⁻¹		
	S/H	S/M	S/R	S/H	S/M	S/R
E1	22,5	25,7	27,5	16,92	19,93	16,24
E2	12,4	15,8	18	9,95	13,76	12,78
E3	10,5	13,9	15,4	18,24	24,68	21,97
E4	7,1	8,7	11,6	13,79	16,94	18,90
E5	6,7	8	9,2	27,74	29,77	33,28
Prom/Total	11,84	14,42	16,34	86,64	105,08	103,17

Todos los sistemas de control de malezas y métodos de cálculo de SC evaluados presentaron -en mayor o menor medida- diferencias negativas (pérdidas) respecto a la cantidad de carbono de la selva, según lo evidencian los resultados del test T para muestras apareadas (parcela de YM & parcela de S). Para este análisis se utilizaron los datos de COS como SC (Tabla 3).

Si se consideran las pérdidas de COS mediante el cálculo de SC EF, en el E1, el control con rastra y herbicida presentó pérdidas significativas respecto a la selva, en el espesor E2, sólo la rastra presentó pérdidas significativas, en el E3, la mayor pérdida se produjo en el control con macheteo y rastra ambos con diferencias estadísticas respecto a la selva. En el E4, solo perdió significativamente el control con rastra y en el E5, ocurren pérdidas de COS con diferencias estadísticas en herbicida y rastra. En general y sumando todas las pérdidas de COS hasta el metro, el control de malezas con rastra produjo las mayores pérdidas de COS, seguido por el control con herbicida y el de menor pérdida de COS fue el macheteo.

En la tabla 4, se muestran los valores obtenidos del cálculo de la prueba T para muestras apareadas. Los valores de la primera fila de las celdas indica la diferencia entre el SC existente en la selva y el SC existente en el tratamiento, respetando los pares de cada

tratamiento. La segunda fila de cada celda indica la pérdida de SC, pero expresado en porcentaje, donde se consideró 100% al valor de SC de la selva de cada muestra apareada.

Tabla 4. Prueba T para muestras apareadas del SC EF y SC ESE. Valores expresados en Mg C ha⁻¹ en los distintos sistemas de control de malezas versus su par de selva nativa. El valor entre paréntesis es el desvío estándar de la diferencia y el asterisco indica diferencias significativas $P \leq 0,05$. La pérdida de C respecto a la selva se indica en porcentaje.

Espesores	SC EF Mg C ha ⁻¹			SC ESE Mg C ha ⁻¹		
	Herbicida	Macheteo	Rastra	Herbicida	Macheteo	Rastra
E1	-3,51* (3,44) -21%	-2,52 (4,14) -13%	-3,89* (3,65) -24%	-5,7* (3,86) -34%	-5,04* (4,15) -25%	-7,53* (2,89) -46%
E2	-0,5 (3,68) -5%	-0,41 (3,77) -3%	-1,73* (1,71) -14%	-1,49 (3,70) -15%	-2,18* (2,35) -16%	-3,17* (2,17) -25%
E3	-2,51 (4,22) -14%	-7,33* (4,60) -30%	-5,8* (5,61) -26%	-4,94* (3,10) -27%	-8,51* (3,97) -34%	-9,08* (4,77) -41%
E4	-1,82 (2,88) -13%	-1,37 (6,56) -8%	-4,48* (4,17) -24%	-2,39* (2,38) -17%	-2,74 (4,42) -16%	-5,94* (3,55) -31%
E5	-8,6* (11,13) -31%	-2,39 (5,36) -8%	-7,67* (7,7) -23%	-9,08* (11,3) -33%	-4,69* (3,98) -16%	-9,91* (7,44) -30%
Total	-16,94 -20	-14,02 -13%	-23,57 -23%	-23,6 -27%	-23,16 -22%	-35,63 -35%

Sobre una base de suelo equivalente, las pérdidas de COS fueron las siguientes: En el E1 todas las pérdidas de COS fueron significativos respecto a la selva, sin embargo se destaca que el control con rastra originó la mayor pérdida y el macheteo la menor. En el E2 el herbicida no presentó diferencias significativas en pérdidas de COS ESE respecto a la selva en cambio la rastra fue la de mayor pérdida. En general en los demás espesores las pérdidas fueron significativas, siendo el tratamiento con rastra el de mayor pérdida porcentual respecto a la selva. Sumando las pérdidas de COS en el perfil hasta 1 m de profundidad, el control de malezas con rastra produjo la mayor pérdida de COS ESE respecto a la selva nativa, luego el control con herbicida y el macheteo que produjo las menores pérdidas en el perfil analizado.

El impacto de los diferentes manejos sobre las propiedades físicas se presenta en tablas sucesivas, en las cuales aparecen los resultados de los análisis físicos realizados, los resultados del ANOVA entre los sistemas de control de malezas (mitad izquierda de las tablas), los resultados estadísticos de la prueba T para muestras apareadas (mitad derecha de las tablas, parcelas de YM & parcelas de S) y las pérdidas expresadas en porcentajes.

Los valores de Dap presentaron diferencias estadísticamente significativas en E2, E3 y E4 (Tabla 5). En términos generales, los valores de Dap fueron significativamente menores en el tratamiento de control de malezas con rastra, siendo variable las diferencias estadísticas con los demás sistemas. No se observan grandes diferencias en valores

absolutos entre las Dap para cada tratamiento, los valores obtenidos indicarían que no hay problemas de compactación en las parcelas de YM muestreadas.

Tabla 5. Densidad aparente en distintos sistemas de control de malezas a diferentes profundidades. Valores expresados en Megagramos por metro cúbico, Dap Mg m^{-3} . Letras distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$) DMS Tukey, entre sistemas de control de malezas y la letra n indica que no hay diferencias significativas. EE (error estándar). En el cuadro de diferencias con la selva se exponen los resultados de la prueba T para muestras apareadas. El valor entre paréntesis es el desvío estándar de la diferencia y el asterisco indica diferencias significativas $P \leq 0,05$. El aumento de la Dap respecto a la selva se indica en porcentaje.

Espesor	<u>Dap Mg m^{-3}</u>				<u>Diferencias con la selva de cada tratamiento</u>		
	EE	Herbicida	Macheteo	Rastra	Herbicida	Macheteo	Rastra
E1	0,02	0,92n	0,92n	0,85n	0,16* (0,15) 19%	0,14* (0,07) 18%	0,25* (0,11) 42%
E2	0,03	0,91ab	0,99a	0,83bc	0,1* (0,09) 12%	0,12* (0,09) 14%	0,11* (0,08) 15%
E3	0,03	1,04a	0,96ab	0,91bc	0,17* (0,13) 20%	0,07* (0,08) 8%	0,18* (0,11) 25%
E4	0,03	1,02ab	1,04a	0,92b	0,04 (0,11) 4%	0,08 (0,14) 8%	0,09* (0,10) 11%
E5	0,03	1,06n	1,01n	1,02n	0,02 (0,07) 2%	0,08* (0,08) 9%	0,09* (0,07) 10%

Con respecto a la diferencia con la selva, todos los sistemas de control de malezas producen un aumento significativo de la Dap de los tres primeros espesores de suelo. El mayor aumento de Dap en valor absoluto ocurrió en E1 con control de malezas con rastra. En el espesor E4 y E5 los aumentos de Dap fueron de menor magnitud, y siempre más altos con rastra.

Los valores significativamente más bajos de CDMP (indican mayor estabilidad de agregados), se lograron en los controles de malezas con macheteo y herbicida, sin diferencias estadísticas entre ambos en E1 y E2 (Tabla 6). Los valores hallados en el manejo con rastra son altos y pueden perjudicar el funcionamiento estructural del perfil.

Tabla 6. Cambio del diámetro medio ponderado, en distintos sistemas de control de malezas a diferentes profundidades. Valores expresados en milímetros, CDMP mm. Letras distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$) DMS Tukey, entre sistemas de control de malezas. EE (error estándar) En el cuadro de diferencias con la selva se exponen los resultados de la prueba T para muestras apareadas El valor entre paréntesis es el desvío estándar de la diferencia y el asterisco doble indica diferencias significativas $P \leq 0,01$. El aumento de CDMP respecto a la selva se indica en porcentaje.

Espesor	<u>CDMP mm</u>				<u>Diferencias con la selva de cada tratamiento</u>		
	EE	Herbicida	Macheteo	Rastra	Herbicida	Macheteo	Rastra
E1	0,04	1,34a	1,19 a	1,67b	0,47** (0,17) 56%	0,37** (0,12) 45%	0,89** (0,16) 114%
E2	0,04	1,67a	1,55 a	2,06b	0,36** (0,16) 27%	0,29** (0,12) 23%	0,74** (0,23) 57%

Comparando con la selva, todos los tratamientos aumentaron significativamente los valores de CDMP, el control de malezas con rastra fue el que produjo mayor pérdida de estabilidad de suelo respecto a la selva nativa.

No se registraron diferencias significativas en resistencia a la penetración entre los tratamientos en ningún espesor de suelo (Tabla 7). Con respecto a la selva a se produjo un notable aumento en el tratamiento con herbicida en el primer espesor seguido por la rastra, en cambio el macheteo no produjo aumento en la RM por el contrario lo redujo un 5%, en el siguiente espesor tampoco se diferencié estadísticamente de la selva. Los demás tratamientos aumentaron la RM respecto a la selva de manera considerable.

Tabla 7 Resistencia mecánica a la penetración en distintos sistemas de control de malezas a diferentes profundidades, el valor de humedad se ubica debajo del valor de RM. Valores expresados en Megapascals (MPa). Letras distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$) DMS Tukey, entre sistemas de control de malezas. EE (error estándar). En el cuadro de diferencias con la selva se exponen los resultados de la prueba T para muestras apareadas El valor entre paréntesis es el desvío estándar de la diferencia y el asterisco indica diferencias altamente significativas $P \leq 0,05$. El aumento de RM se indica en porcentaje.

Espesor	EE	<u>RM MPa</u>			<u>Diferencias con la selva de cada tratamiento</u>		
		Herbicida	Macheteo	Rastra	Herbicida	Macheteo	Rastra
E1	0,14	0,88a 27,47	0,71a 28,20	0,82a 28,75	0,46* (0,39) 110%	-0,04 (0,21) -5%	0,25* (0,15) 44%
E2	0,14	1,52b 31,62	1,13ab 32,46	1,31ab 33,16	0,66* (0,57) 78%	0,27 (0,26) 31%	0,4* (0,24) 44%
E3	0,13	1,11a 32,11	1,18a 34,46	1,39a 39,59	0,15 (0,32) 16%	0,28 (0,40) 31%	0,11 (0,45) 9%

Los resultados del ANOVA para la TI (Tabla 8), indican que no hay diferencias estadísticas entre los sistemas de control de malezas, sin embargo en valores absolutos la mayor TI se logra con macheteo, seguido por el herbicida y la menor TI se produce con la rastra. En la prueba T para muestras apareadas, el control con rastra fue el sistema que más disminuyó la infiltración en valores absolutos.

Tabla 8. Tasa de infiltración en cm hora^{-1} , en distintos sistemas de control de malezas No hay diferencias significativas ($P \leq 0,05$) DMS Tukey, entre sistemas de control. EE (error estándar) En el cuadro de diferencias con la selva se exponen los resultados de la prueba T para muestras apareadas El valor entre paréntesis es el desvío estándar de la diferencia y el asterisco doble indica diferencias altamente significativas $P \leq 0,01$. La pérdida de Ti respecto a la selva se indica en porcentaje.

EE	<u>Tasa de infiltración mm min^{-1}</u>			<u>Diferencias con la selva de cada tratamiento</u>		
	Herbicida	Macheteo	Rastra	Herbicida	Macheteo	Rastra
16,01	14,73a	19,36a	10,57a	-176,34** (184,61) -92%	-186,55** (386,86) -91%	-231,85** (380,24) -95%

En la tabla 9 se presentan los valores de cobertura de suelo expresados en porcentajes

El control de malezas con rastras produjo la menor cobertura, diferenciándose significativamente de los demás sistemas evaluados. Respecto a la comparación con la selva de cada tratamiento solamente la rastra se diferenció significativamente respecto de su par de selva nativa.

Tabla 9. Porcentaje de cobertura en distintos sistemas de control de malezas. Letras distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$) DMS Tukey, entre sistemas de control. EE (error estándar). En el cuadro de diferencias con la selva se exponen los resultados de la prueba T para muestras apareadas El valor entre paréntesis es el desvío estándar de la diferencia y el asterisco doble indica diferencias altamente significativas $P \leq 0,01$. La disminución de la cobertura se indica en porcentaje.

EE	<u>% de Cobertura</u>			<u>Diferencias con la selva de cada tratamiento</u>		
	Herbicida	Macheteo	Rastra	Herbicida	Macheteo	Rastra
3,67	81a	86a	28b	19* (5,70)	14* (5,70)	72** (17,31)

5. Discusión

El control de malezas con macheteadora produjo los mayores valores de COS expresado como concentración y también en términos de stock de C. El mantenimiento de las malezas vivas generalmente gramíneas, controladas mediante cortes sucesivos generó aportes continuos de materia orgánica aérea y radical (López *et al.*, 2011). Estos valores de stock de C coinciden con los hallados por Botero (2011) en pastizales tropicales, quien estimó entre 16 y 48 Mg C ha⁻¹ en la profundidad de 0 - 30 cm. También coinciden con los resultados de otros autores (Espinosa, 2006; Hernández *et al.*, 2007) para quienes hasta un metro de profundidad el stock de C varía de 80 a 100 Mg C ha⁻¹ en las zonas tropicales. En la misma zona de estudio, en un ensayo con pasto elefante como cubierta verde mantenida con sucesivos cortes, Piccolo (2001a), logró similares aumentos de COS para la recuperación de plantaciones de YM.

El manejo con rastra disminuye notablemente los contenidos de COS y el stock de C, sobre todo en los espesores superficiales, tal como lo muestra resultados hallados por Venialgo *et al.*, (2002) en suelos de Corrientes, Toledo *et al.*, (2013) en Misiones y Hernandes *et al.*, (2007) en suelos ferralíticos cubanos. El control de malezas con herbicida se realiza sin remoción, y es considerado como una labranza de conservación tendiente a aumentar el nivel de COS (Rasmussen & Parton, 1994; Lal, 1997; FAO, 2002). Aun con elevada cobertura del suelo en las parcelas, el bajo aporte en peso del material orgánico producto del sistema de control, hace que no se llegue a compensar la tasa de mineralización elevada de estos ambientes tropicales (Martin & Rivera, 2004), alcanzando valores similares a los obtenidos con los controles de rastra (Janzen, 2006). Algunos autores como Pretty & Ball, (2001) discuten sobre las diferencias entre agricultura de conservación y labranza cero, aludiendo a que son propuestas diferentes. Gran parte de la agricultura de conservación, tiende a ser un sistema agrícola moderno simplificado - evitando, por lo tanto, la erosión- pero con poca aplicación de principios agroecológicos para el buen manejo de los nutrientes, las malezas y las plagas.

Las pérdidas informadas de stock de C respecto a la selva son generalizadas para todos los manejos respecto a la selva nativa. La mayor descomposición del COS producto del desmonte y la alteración producida por el laboreo impacta en las reservas de COS desde los primeros años de cultivo, como fuera hallado por varios autores (Dalal & Mayer, 1986; Havlin *et al.*, 1990). El control con rastra genera la mayor pérdida de SC ESE (-46%) en el primer espesor, produciendo una reducción de COS del 35% hasta el metro de profundidad. Estos valores son semejantes a los encontrados por Dalurzo *et al.*, (2001). Los manejos sin remoción de suelo ocasionaron menores pérdidas, el manejo con macheteadora, disminuyó un 22% seguido del manejo con herbicida 27% de SC ESE coincidiendo con lo reportado por Lupi *et al.* (2002) y Lugo *et al.* (1986), en plantaciones de pino, en tanto que Toledo *et al.* (2010), determinaron bajo tabaco pérdidas del 46%. Otros autores como Píccolo *et al.* (2001a), en Ultisoles bajo cultivo de yerba y Amado *et al.* (2006), en Oxisoles bajo cultivo de poroto negro-maíz, determinaron también pérdidas similares. La metodología de muestreos apareados resultó ser muy eficiente para mostrar los cambios de stock que se producen en lotes cultivados (Heim *et al.*, 2009; Alvares *et al.*, 2012). De acuerdo a Wooster & Palm (1998), el bosque prístino, por ejemplo en la Amazonía, es el ecosistema que contiene la mayor cantidad de carbono (305 t/ha, de las cuales el 28 % en el suelo) esto coincide con los valores en selva hallados en esta tesis (Tabla 3).

Como se observa en la Tabla 2 hay una estratificación del COS en los manejos sin remoción del suelo, en el caso de los manejos con rastra se mezclan homogeneizando los horizontes superficiales hasta donde son afectados por el movimiento de los discos. Estos resultados coinciden con numerosos trabajos donde indican una estratificación del COS al disminuir o anular las labranzas de suelo (Sanchez, 1981; West & Post 2002; Primavesi, 2002; Moreno *et al.*, 2006; Soler da Silva *et al.*, 2006; Álvarez & Steinbach 2006; Franzluebbbers *et al.*, 2007). Franzluebbbers (2002), indica que la estratificación de la materia orgánica es un proceso común en ecosistemas naturales. A largo plazo, sistemas sin remoción van a promover gradualmente la estratificación del COS entre la capa superior del suelo y capas del subsuelo (Franzluebbbers, 2002; Sa' & Lal, 2009; Ferreira *et al.*, 2012). En contraste, la labranza convencional (LC) promueve la inversión frecuente de las capas del suelo y una distribución más uniforme del COS a través del perfil del suelo como lo indican también trabajos de Angers *et al.*, (1995) Hernanz *et al.*, (2002) y Galantini *et al.*, (2006). Las diferencias en la concentración de COS se hallan hasta los 0,2 m de profundidad entre los diferentes manejos de malezas, en zonas templadas esas diferencias se acortan a 0,07 m de la superficie (Potter *et al.*, 1997).

El cálculo de SC ESE, resultó más adecuado para expresar las cantidades de carbono, ya que existen diferencias significativas en la Dap entre los diferentes espesores medidos, impactando en los resultados de COS. En suelos subtropicales de la región, Toledo *et al.*, (2013) también encontraron que el cálculo de SC a ESE aísla los valores de SC de la influencia de la Dap. Ello evita la sobreestimación de los valores de COS, como sucede con los cálculos de SC a EF, que fueron afectados por las diferencias observadas en Dap (Tabla 6).

En el primer espesor estudiado (0-0,10 m), la falta de remoción del suelo produjo un leve aumento de la Dap en los manejos con macheteo y herbicida (manejos sin remoción), siendo las Dap en rastra sensiblemente menores pero sin haber diferencias estadísticas entre ellos (Tabla 5), coincidiendo con trabajos de Soler da Silva *et al.* (2006), Costa *et al.* (2003). En los espesores inferiores comenzaron a detectarse diferencias significativas pero sin grandes variaciones en la Dap (Barbaro & Sosa 2014, Thomaz & Antonelli 2008, Imoff *et al.*, 2001). En Oxisoles de Brasil, Marques da Silveira (1999), encontró diferencias estadísticas para los espesores 0-10, 10-20, 20-30 entre rastra y labranza cero, con valores de Dap más elevados que lo hallado en esta tesis ($1,30-1,45 \text{ Mg m}^{-3}$), pero coincidiendo en que las diferencias de Dap entre los tratamientos no fue de grandes magnitudes. Albuquerque *et al.*, (1995) y Costa (2001), trabajando con Latosoles Rojos oscuros del Brasil, no observaron aumento de Dap., en labranza cero comparada con labranza convencional, indicando la gran influencia de la composición granulométrica y mineralógica de este tipo de suelo en el proceso de compactación.

Ninguno de los valores de Dap obtenidos en los diferentes espesores y manejos representó por su magnitud limitaciones para la exploración radical, esto se evidenció en el momento de los muestreos al encontrar gran cantidad de raíces en el suelo.

Al hacer la comparación con los valores de la selva (test T apareado) el uso de rastra produjo el mayor aumento de Dap impactando sobre todo en el espesor superficial, llegando este efecto a los estratos inferiores (Tabla 5). Luego del desmonte y limpieza del terreno, todas las plantaciones de YM fueron manejadas con sucesivas pasadas de rastra durante algunos años, pero como demuestran los resultados el cambio a labranza cero redujo en un 20 % aproximadamente la compactación a diferencia del manejo continuado con rastra que produjo una compactación del 42 % respecto a la selva nativa en el primer

espesor continuando este mayor aumento en los espesores subsiguientes. Dalurzo *et al.*, (2002 y 2005) determinaron que en Oxisoles bajo cultivo de Citrus también se aumentó la Dap respecto a la situación de selva nativa. Otros autores en diversos cultivos, llegan también a las mismas conclusiones (Gonzalez *et al.*, 2003; Toledo *et al.*, 2010).

Entre los manejos evaluados aquellos que no remueven el suelo generan una mejor estabilidad de agregados, similares resultados obtuvo Venialgo *et al.*, (2003) quien en yerbales del nordeste de Corrientes, evaluó varios manejos de suelo y llegó a la conclusión que no removiendo el suelo se logra mayor estabilidad del suelo respecto a laboreos con rastra, al igual que Bertol *et al.*, (2004) en Latosoles Arcillosos Rojos del Brasil. Entre los dos controles de malezas sin remoción de suelo, el macheteo genera menor CDMP el beneficio de no matar las malezas y mantenerlas vivas pero controladas produce en la rizósfera un continuo aporte de agentes cementantes. Según Loveland & Webb (2003), sólo una parte de la materia orgánica del suelo influye sobre la estabilidad de los agregados, la cual es la materia orgánica fresca o activa, rica en mono y polisacáridos, raíces e hifas de hongos lo que logra la permanencia de los agregados de mayor tamaño.

En comparación a la selva nativa, cualquier sistema de control de maleza que se implemente reduce la estabilidad de agregados de manera muy significativa, pero el control de malezas con rastra lo hace en mayor magnitud (114%). En los sistemas sin remoción de suelo, además de no existir la ruptura mecánica de los agregados, existe el beneficio de las raíces de las malezas en diversos tamaños, abundancia y profundidades que favorecen la agregación. La reducción en la estabilidad hallada en el macheteo y herbicida respecto a la selva no son elevados y se encuentran dentro de valores aceptables y normales para este tipo de suelos. En el control con macheteo se potencia aún más este beneficio por que las raíces están vivas y siguen produciendo agentes cementantes que mejoran la estabilidad estructural (Degens, 1997). Numerosas evidencias señalan una estrecha relación entre la estabilidad de los agregados de suelo y la presencia de hongos (Tisdall 1991, 1994) encontrándose alta correlación entre la longitud de la hifa y el diámetro de los agregados (Thomas *et al.*, 1993). En suelos subtropicales y tropicales la elevada estabilidad de la estructura se relaciona con la participación de los óxidos de Fe en la estabilización de los microagregados y los óxidos de Al y Mn en los macroagregados (Alekseeva *et al.*, 2009). Estos agentes de unión persistentes (Edwards & Bremner, 1967) son los factores predisponentes de la gran estructura física de los oxisoles y ultisoles de regiones tropicales y subtropicales (Duxbury *et al.*, 1989).

La RM no presentó diferencias estadísticas entre los controles de malezas, pero comparado con la selva se produce un aumento significativo en los controles con herbicida y rastra sobre todo en los dos primeros espesores. En suelos rojos de la Provincia de Misiones, varios autores también hallaron aumentos de la resistencia mecánica a penetración como consecuencia de uso agrícola (Imoff *et al.*, 2001; Dalurzo *et al.*, 2002; Gonzalez *et al.*, 2003; Toledo *et al.*, 2010). Es interesante notar que el manejo con macheteo tuvo similar RM que el suelo de la selva, e inclusive lo mejoró en el E1 (Tabla 6). La menor intensidad de tránsito y menor peso sobre el suelo, por un lado, y el mantenimiento de las raíces vivas y el continuo aporte y descomposición de materia orgánica, por el otro, fueron responsables de este mejor funcionamiento. El aumento de la RM estaría más relacionado con factores mecánicos antrópicos, la presencia de cobertura espontánea o malezas y sus raíces hacen un efecto remediador de la compactación producida en el suelo (Calegari *et al.*, 1993; Campos *et al.*, 1999; Derpsch 1999)

La tasa de infiltración de agua no presentó diferencias significativas entre los manejos de malezas, cabe hacer la aclaración que con la metodología utilizada no se ha llegado a medir la infiltración básica (com. Pers., Taboada) por la excesiva infiltración del estrato superficial, los valores en esta tesis reflejan la velocidad de infiltración de una lámina de 25 mm de agua que luego se llevó a mm min^{-1} por ser una unidad generalizada en la temática. En este sentido Von Walis (2013), tuvo los mismos inconvenientes metodológicos midiendo la tasa de infiltración en plantaciones forestales. Si bien no hay diferencias estadísticas, se observa que la Ti del control con macheteo es de casi el doble de la Ti de la rastra y con valores intermedios se encuentra el herbicida. La gran variabilidad de los datos sean probablemente la causa de no presentar diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), a pesar de las reducciones observadas en los valores medios de los tratamientos, coincidente con las situaciones citadas por Sarrantonio *et al.*, (1996) y Venialgo *et al.*, (2004). De acuerdo a Henriquez *et al.*, (2012), los altos valores de infiltración en estos suelos responden a un tipo de textura denominado “pseudoarenas”, que se dan en estos tipos de suelos que presentan predominancia de arcillas 1:1 (principalmente caolinita) y óxidos de Fe y Al. Aunque estos materiales son finos, la formación de puentes de H en las arcillas tipo 1:1, propicia que las partículas se agreguen entre sí dando estructuras más desarrolladas. Estas a su vez, se recubren de óxidos y constituyen un tipo de partícula de mayor tamaño que es conocida como “pseudoarena”. La presencia de agregados estables en estructuras granulares confiere a estos suelos una condición física excelente, en particular, en lo que se refiere al drenaje natural.

La Ti en las parcelas de selva supera ampliamente a las parcelas con uso agrícola cuales quiera sea su manejo. Wahl *et al.*, (2003) señala que la mayoría de los suelos tropicales de bosque tienen la capacidad de absorber agua a un ritmo rápido, el cambio de uso del suelo de vegetación nativa a cultivos, hace que muchos suelos tropicales hayan sufrido importantes cambios en sus propiedades físicas afectando a los macroporos del suelo, resultando en una disminución de éstos que influyen a su vez sobre la tasa de infiltración del agua. (USDA 1999; Yimer *et al.*, 2008).

El bajo porcentaje de cobertura como consecuencia del control con rastra (28%), produce la ruptura de los agregados, comenzando con los procesos de erosión hídrica, considerando la alta pluviosidad en regiones tropicales y subtropicales, como sucede en la Provincia de Misiones. Según Lal (1997), el porcentaje mínimo de cobertura es del 30%, esto se logra ampliamente mediante los controles de malezas con herbicida o macheteo (81% y 86%). La agricultura con cobertura viva o muerta es una práctica concreta del manejo del suelo que permite al mismo tiempo su cobertura con plantas que dan protección contra la erosión y que proveen además residuos de biomasa para aumentar la materia orgánica del suelo (FAO, 2002). Para ser completamente efectiva, tanto la cobertura viva como la muerta deben ser efectuadas en el lugar y en combinación con la labranza de conservación (manejo agrobiológico). La cantidad de cobertura, dependiendo de la zona climática, debería ser de varias docenas de t/ha/año , para proporcionar una fuente importante de carbono al suelo de $0,1 \text{ t/ha/año}$, dependiendo de la zona climática (Lal, 1997). Existen una gran variedad de plantas que pueden ser usadas como cobertura del suelo y la calidad de los residuos de las plantas también es un factor importante (Heal *et al.*, 1997; Drinkwater *et al.*, 1998).

6. Conclusiones

De los diferentes manejos de malezas evaluados, el macheteo demostró ser el más beneficioso, hecho que fue demostrado por los valores significativamente más altos de contenido y también de stock de C y la mejor calidad de la estructura con tendencia a una mayor infiltración instantánea y una mayor cobertura del suelo. El manejo con herbicida presentó también una buena calidad estructural, levemente inferior a la del macheteo, pero con mayor reducción del COS y stock de C. De todos los tratamientos, el control con la rastra de disco fue el menos beneficioso, ya que generó los menores valores de COS.

Los resultados demuestran que el mantenimiento vivo de las malezas de manera controlada (control con macheteo) produjo mayores ingresos de carbono al suelo y mejores características estructurales. Ello no aporta evidencia suficiente para rechazar la Hipótesis específica A.

Por otra parte, los manejos de malezas sin remoción de suelo perdieron menos COS respecto a las situaciones de selva nativa y presentaron en general mejores condiciones estructurales. Estos resultados no aportan evidencia suficiente para rechazar la Hipótesis específica B.

En definitiva, los métodos de control de malezas que no producen remoción de suelo demostraron ser más apropiados para mitigar la pérdida de calidad respecto a la selva subtropical. Estos resultados no aportan suficiente evidencia para rechazar la hipótesis general de este capítulo.

Capítulo IV

Relación entre el COS y las propiedades físicas en Ultisoles.

1. Introducción.

Numerosos investigadores han demostrado que el COS afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, vinculadas con su: 1) calidad (Carter, 2002, Wander *et al.*, 2002), 2) sustentabilidad (Carter, 2002, Acevedo & Martínez, 2003) y 3) capacidad productiva (Sánchez *et al.*, 2004, Bauer & Black, 1994). En un manejo sustentable, el COS debe aumentarse o bien mantenerse. Sin embargo, dado la multiplicidad de factores implicados, es complejo establecer una clara relación directa de dependencia entre el COS y la productividad del suelo (Moreno *et al.*, 1999).

Los suelos de la Provincia de Misiones son profundos, se han desarrollado sobre rocas basálticas en un ambiente de selva subtropical único en el territorio Argentino (SAGyP INTA, 1990). Como resultado de la intensa alteración geoquímica en ambiente subtropical, en su fracción fina son predominantes los minerales caoliníticos y los óxidos de hierro. Se piensa que estos suelos se caracterizan por sus adecuadas propiedades físicas, lo cual a veces genera descuidos en cuanto a su manejo agronómico. A pesar de la textura arcillosa, el efecto agregante de los óxidos de hierro genera una adecuada estructura y porosidad, posibilitando buenas condiciones de permeabilidad y aireación. (Morrás & Píccolo, 1996). Esta buena permeabilidad acompañada de la elevada tasa de infiltración es una necesidad en estos suelos altamente susceptibles a la erosión hídrica.

1.1 Antecedentes específicos en suelos tropicales.

El cambio exitoso de selvas tropicales en sistemas de producción sostenibles ha dependido en gran parte de un buen manejo de la estructura del suelo (Sanchez, 1976; Lal & Cummings 1979). Esta buena calidad depende de coloides agregantes relacionados con la materia orgánica del suelo, y en especial en suelos tropicales y subtropicales de los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio como fuertes agentes cementantes. Los suelos tropicales no son necesariamente más bajos en COS que los suelos de clima templado, pero la tasa de mineralización de COS puede ser significativamente más rápida en los trópicos y la formación de humus estable es muy baja.

La relación entre COS y propiedades físicas fue probada por varios investigadores en zonas templadas (Tallarico & Caravello, 1964; Álvarez & Steinbach, 2006; Studdert *et al.*, 1997; Diaz-Zorita y Grosso, 2000). Sin embargo, en zonas tropicales la presencia de otros agentes cementantes como las asociaciones con oxihidróxidos de Fe y Al (Rojas, 1997) hacen enmascarar los efectos o las relaciones con el COS y las propiedades físicas del suelo, quedando poco claras las influencias del COS en el funcionamiento estructural del suelo.

1.2 Estado del arte en Ultisoles de Misiones.

La mayoría de los trabajos de investigación en suelos de Misiones tendieron a evaluar efectos en las propiedades químicas y referentes a la fertilidad en YM (Sosa, 1992 y 2014), cubiertas y abono verde (Erracaborde, 1973; Morras & Piccolo., 1996; Piccolo, 2001a; Barbaro & Ohashi 2011), pérdida de suelo (Gruner 1955) en menor medida las propiedades físicas (Casas *et al.*, 1983; Píccolo *et al.*, 1997). Más recientemente algunas propiedades físicas fueron determinadas por Lupi *et al.*, (2007), quien comparó suelos con y sin residuos forestales en superficie hallando diferencias significativas en las fracciones de agregados de menor tamaño (2,68 mm), siendo mayores en el suelo sin cobertura, habiendo perdidas de macro agregados, la proporción de agregados estables parece ser uno de los parámetros más sensibles al manejo del suelo. Sin embargo Piccolo *et al.*, (1997), no halló impactos del manejo del suelo en yerba mate sobre el porcentaje de macro agregados, el cual fue siempre mayor a 85%, aun cuando los valores de materia orgánica fue diferente en los tratamientos evaluados. Recientemente Von Walis *et al.*, (2014), encontró diferencias en la capacidad de campo entre diferentes manejos de suelo forestal pero no encontró correlaciones en las propiedades físicas del suelo y el COS en Ultisoles del norte de Misiones. En este capítulo se propone investigar la influencia del COS sobre las propiedades físicas de los Ultisoles en Misiones utilizados para las plantaciones de YM, abarcando el área sur y centro-norte de la provincia.

2. Objetivo e hipótesis generales

En este capítulo se analizará la relación entre el COS y la calidad de la estructura de los Ultisoles en Misiones, medida a través de diferentes parámetros (e.g. estabilidad estructural, tasa de infiltración, densidad aparente).

La hipótesis de trabajo es que la calidad de la estructura se relaciona con el contenido de COS, pero el tipo de relación depende de cada propiedad física.

2.1 Objetivos e hipótesis específicos.

Dado la vulnerabilidad de estos suelos a la erosión hídrica, es importante de detectar si la velocidad o tasa de infiltración de agua guarda alguna relación con propiedades como el COS, la estabilidad de agregados o la densidad de suelo.

Se hipotetiza que la infiltración de estos suelos se relaciona con la calidad de la estructura, determinada por un conjunto de propiedades físicas.

3. Materiales y métodos

3.1 Caracterización de sitios.

Se trabajó con el grupo 2 de las muestras (ver capítulo II). Los sitios de muestreo se localizaron a la vera de las rutas nacionales (12 y 14), que corren paralelas y en sentido longitudinal a la provincia. Todas las parcelas corresponden al mismo orden de suelo Ultisoles, de textura arcillosa, con plantaciones de YM de entre 20 a 40 años de antigüedad en producción. No se tuvo en cuenta el rendimiento del cultivo, por la gran variabilidad desde su genética hasta las formas y momentos de cosecha que realizan los productores en sus yerbales, siendo un factor externo muy difícil de homogeneizar. En el grupo 2 están incluidas las parcelas del grupo 1. De este último set se utilizaron los datos del espesor 1 y 2. En total se cuenta con 47 parcelas, estas fueron seleccionadas con el fin de conseguir una variabilidad en los % COS y poder relacionar estos valores de COS con las propiedades físicas.

Debido a que la elección de estos lotes fue al azar, los manejos de suelo para control de malezas no siempre se hacían de la misma manera, año a año variaban por diferentes razones (económica, temporales, oportunidad de laboreo, etc.).

En la Tabla 1 se muestran todas las parcelas utilizadas para este capítulo, con alguna información cualitativa para caracterizarlos, como si se realiza o no remoción del suelo para el control de las malezas. Esta determinación fue obtenida en base a experiencia profesional propia, y la existencia de rasgos o síntomas de utilización de la rastra de discos en el suelo. También cualitativamente se observó en base a apreciación personal el estado general de la parcela de YM, a fin de evaluar el grado de coincidencia entre la calidad con que se califica al lote en una visita profesional, la cual es tipo subjetivo, y la calidad de la estructura del suelo medida cuantitativamente. Se confeccionó la siguiente escala de “calidad cualitativa”:

Mala: se observa suelo desnudo, síntomas de escorrentía superficial, plantas de YM de pobre estructura, pocas hojas, color verde claro.

Regular: suelo con algo de cobertura natural, los rasgos de erosión son localizados, el aspecto de la planta de YM es normal.

Buena: suelo con cobertura natural con diversidad de especies, no se observan rasgos de escorrentía de agua, las plantas de YM tienen buena estructura, muchas hojas y el color es verde oscuro.

Tabla 1. Características de manejo y calidad de las parcelas muestreadas.

Nº Parcela	Manejo de malezas	Calidad de la parcela
1	Con remoción	Mala
2	Con remoción	Mala
3	Sin remoción	Buena
4	Sin remoción	Regular
5	Con remoción	Mala
6	Sin remoción	Mala
7	Selva	Selva
8	Sin remoción	Buena

9	Con remoción	Regular
10	Selva	Selva
11	Con remoción	Mala
12	Sin remoción	Regular
13	Sin remoción	Mala
14	Sin remoción	Buena
15	Sin remoción	Regular
16	Con remoción	Mala
17	Sin remoción	Regular
18	Sin remoción	Buena
19	Con remoción	Mala
20	Sin remoción	Regular
21	Sin remoción	Buena
22	Sin remoción	Regular
23	Con remoción	Mala
24	Selva	Selva
25	Con remoción	Mala
26	Con remoción	Regular
27	Con remoción	Mala
28	Con remoción	Mala
29	Con remoción	Regular
30	Sin remoción	Regular
31	Sin remoción	Mala
32	Con remoción	Mala
33	Con remoción	Mala
34	Con remoción	Mala
35	Sin remoción	Regular
36	Sin remoción	Regular
37	Sin remoción	Bueno
38	Sin remoción	Regular
39	Sin remoción	Regular
40	Sin remoción	Bueno
41	Selva	Selva
42	Selva	Selva
43	Selva	Selva
44	Selva	Selva
45	Selva	Selva
46	Selva	Selva
47	Selva	Selva

3.2 Determinaciones específicas

Se extrajeron muestras de dos espesores (E) de suelo a las siguientes profundidades: E1 0-0,1 m; E2 0,1-0,2 m. Se realizó el muestreo en la parte central de las parcelas con tres muestras simples en cada una, en cada espesor se determinó el COS, Dap, CDMP y RM. En el E1 se midió la tasa de infiltración y el porcentaje de cobertura, cuyas metodologías están descriptas en el capítulo II punto 3.

3.3 Análisis estadístico

Fue explicado en el capítulo II punto 4.

4. Resultados

La selección de parcelas para los muestreos cumplió con las expectativas, pues la selección de las mismas dio como resultado una gran variabilidad de contenido de COS a lo largo de la provincia. En la figura 1 se muestran los valores de los muestreos realizados para COS en cada parcela.

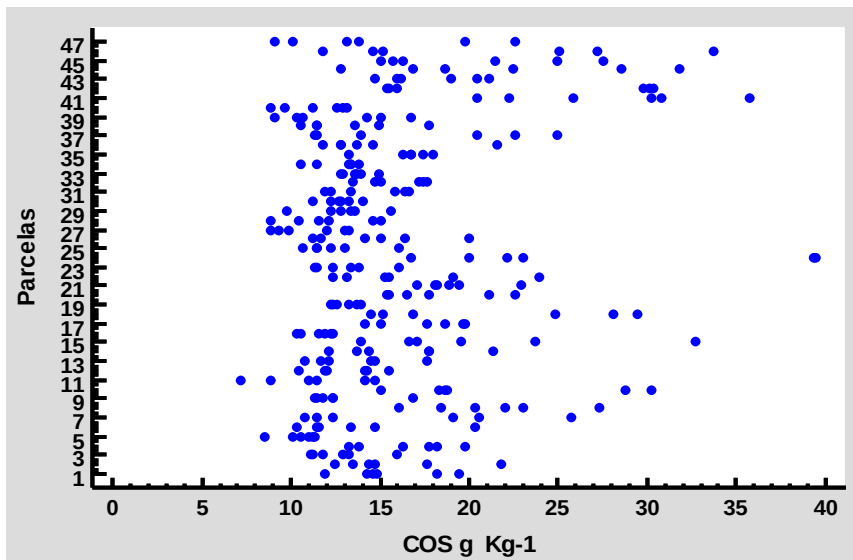


Figura 1. Porcentaje del COS en las parcelas muestreadas. Valores de los dos espesores E1 y E2.

A continuación, se presentan las relaciones entre el COS como variable regresora y las propiedades físicas medidas en el suelo.

La Dap varió con el COS siguiendo una relación de tipo exponencial, En el E1 el R^2 explicó el 30,38% de la variación de Dap (Figura 2). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dap Mg m}^{-3} = \exp (0,225129 - 0,0167417 * \text{COS\% } 0-0.1 \text{ m})$$

Existe una relación estadísticamente significativa entre Dap y COS 0-0.1 m con un nivel de confianza del 95,0%, el valor del estadístico F (60,65) indica que la recta de

regresión es distinta de 0 y el coeficiente de correlación es igual a $-0,551173$, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

En el espesor E2, el coeficiente de determinación R^2 fue bajo, 10,02 % (Figura 3). El coeficiente de correlación es igual a $-0,316537$, indicando una relación relativamente débil entre la Dap y el COS.

A similar rango de Dap en los dos espesores, existió mayor variación en el COS en el E1 (de 10 a 40 g kg^{-1}) que en el E2 (de 10 a 25 g kg^{-1}).

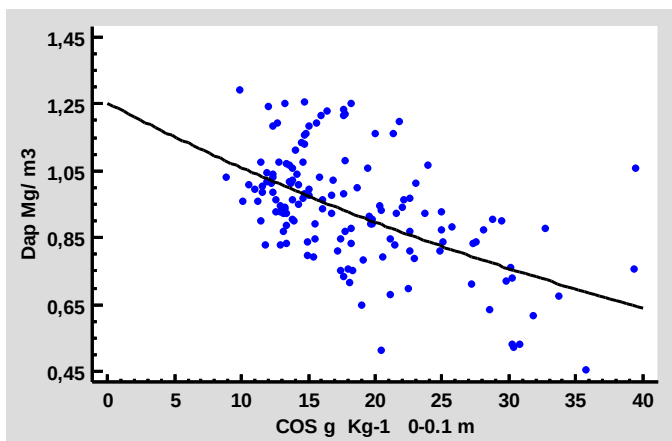


Figura 2. Gráfico de regresión simple del tipo exponencial entre la Densidad aparente (Dap) y carbono orgánico del suelo (COS) en el espesor de 0-0.1m. R^2 30,38% valor de F 60,65.

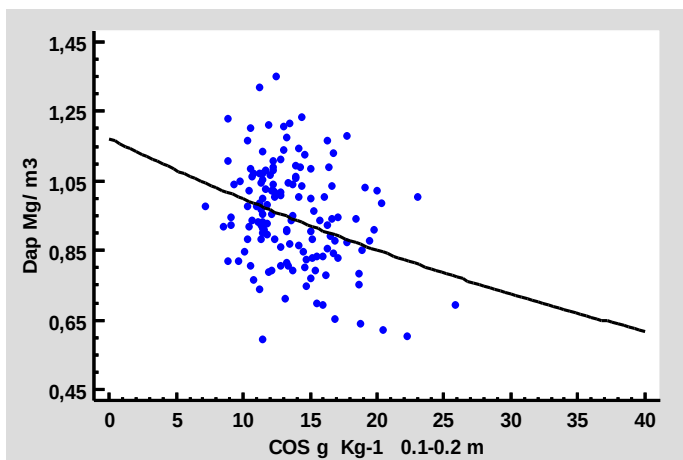


Figura 3. Gráfico de regresión simple del tipo exponencial entre la Densidad aparente (Dap) y carbono orgánico del suelo (COS) en el espesor de 0.1-0.2 m. R^2 10,02 % valor de F 15,48.

La relación entre el contenido hídrico y Dap puede ser indicadora de cambios de volumen en los suelos (Taboada et al. 1988), sin embargo en los Ultisoles analizados el coeficiente de determinación R^2 fue de 14,62% y el coeficiente de correlación igual a $-0,38$ indicando una relación relativamente débil. Estos resultados nos dan la pauta que se trata de suelos rígidos como es de esperarse en arcillas de retículo 1:1 como las caolinitas predominantes en estos suelos (Figura 4).

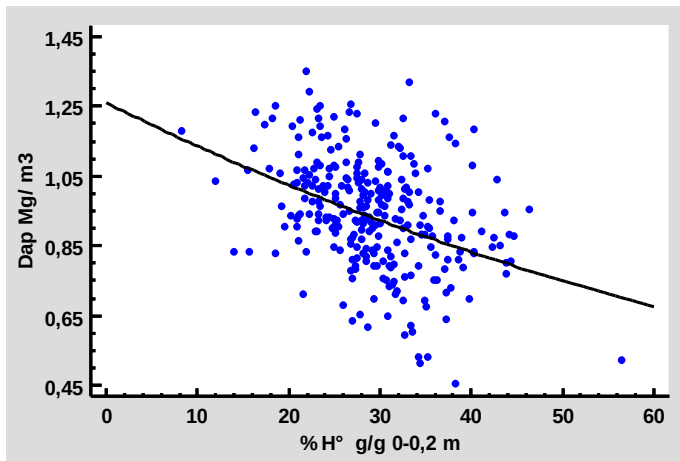


Figura 4. Gráfico de regresión simple del tipo exponencial entre la Densidad aparente (Dap) y la Humedad del suelo (H° %) en los dos espesores E1 y E2. R^2 14,62% valor de F 47,95.

El CDMP, cuánto menor, mayor es la estabilidad de agregados, la relación que existe con el COS depende del espesor seleccionado. En el espesor 1 el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explicó 36,92% de la variabilidad del CDMP. La ecuación del modelo es de tipo exponencial:

$$\text{CDMP mm} = \exp(1,14208 - 0,050254 * \text{COS \% } 0-0.1 \text{ m})$$

Existe una relación estadísticamente significativa entre CDMP y COS 0-0.1 m con un nivel de confianza del 95,0%, el valor del estadístico F (81,37) indica que la recta de regresión es distinta de 0 y el coeficiente de correlación es igual a -0,61, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

En el E2 el coeficiente de correlación R^2 disminuye a 25,48 %, la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{CDMP mm} = \exp(1,22934 - 0,0585661 * \text{COS \% } 0,1-0.2 \text{ m})$$

Existió una relación estadísticamente significativa entre CDMP mm y COS g Kg^{-1} con un nivel de confianza del 95,0%, el valor de F (47,53) indicó que la recta de regresión es distinta de 0 y el coeficiente de correlación es igual a -0,50 indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

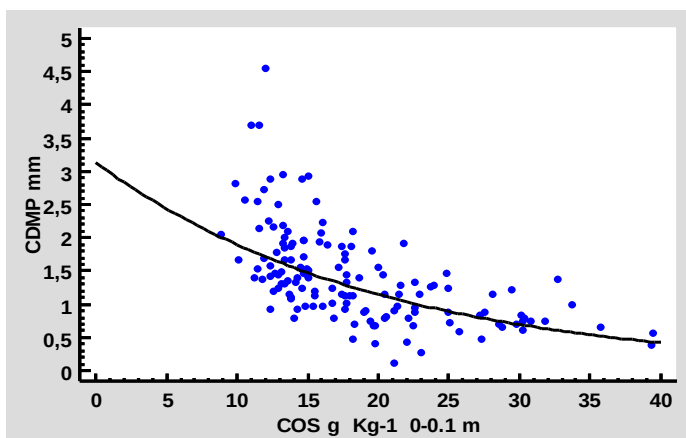


Figura 5. Gráfico de regresión simple del tipo exponencial entre el diámetro medio ponderado (CDMP) y carbono orgánico del suelo (COS) en el espesor de 0-0.1m. R^2 36,92% valor de F 81,37.

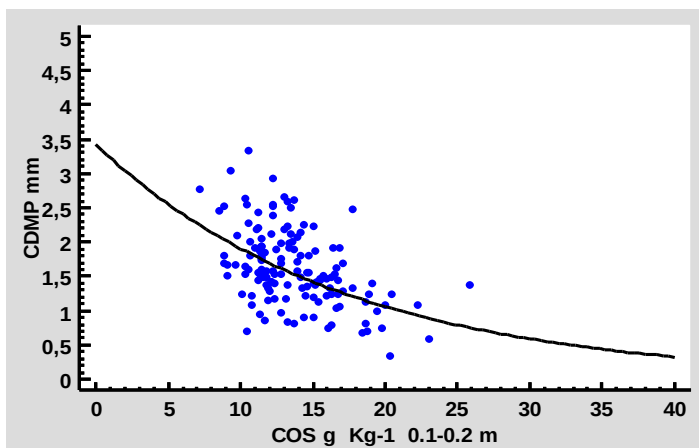


Figura 6. Gráfico de regresión simple del tipo exponencial entre el diámetro medio ponderado (CDMP) y carbono orgánico del suelo (COS) en el espesor de 0.1-0.2m. R^2 25,48% valor de F 47,53.

La resistencia mecánica a la penetración (RM), es una variable que depende del contenido hídrico del suelo (Wilson et al, 2006). Por tal motivo, se realizó la regresión entre la RM medida en MegaPascuales como variable dependiente y la humedad como variable regresora, con el fin de conocer el grado de relación existente entre ambas variables (figuras 7 y 8).

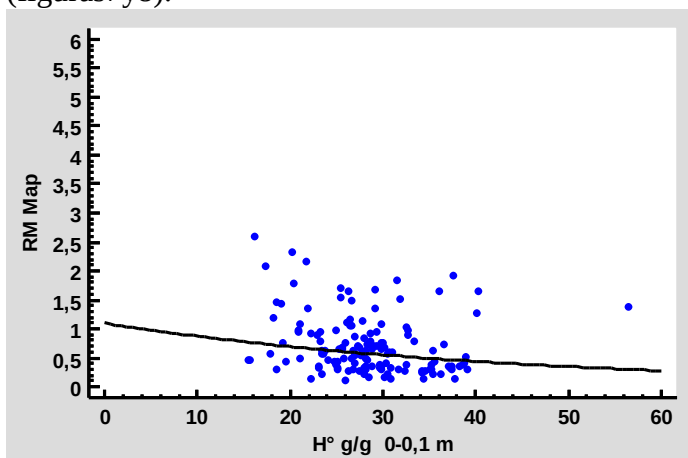


Figura 7. Gráfico de regresión simple de tipo exponencial entre la RM y la humedad (H° g/g) en el E1. R^2 4,20% valor de F 6,10.

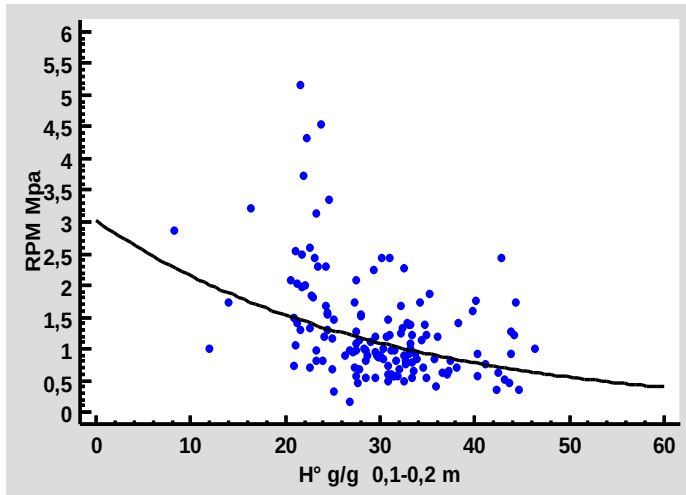


Figura 8. Gráfico de regresión simple de tipo exponencial entre la RM y la humedad (H° g/g) en el E2. . R^2 16,46 % valor de F 27,40.

Los coeficientes de correlación para el E1 y E2 fueron -0,20 y -0,41 respectivamente, indicando una relación débil entre las variables. En humedades de suelo de entre 10 a 25 % se encuentra la mayor variabilidad de RM, con un rango que va desde 0.1 Mpa hasta 5 Mpa. En cambio, en humedades por encima del 25 % ésta oscilación disminuye, y las variaciones de RM van de 0,1 Mpa a 2 Mpa.

Los análisis de regresión entre la RM y el COS indican que tampoco hubo relación entre estas variables en ambos estratos. (E1 R^2 0,67 % F 0,94 y E2 R^2 6,34% F 9,40).

La tasa de infiltración de agua mostró valores de por sí muy elevados con la metodología utilizada. Con esta metodología (USDA), en éstos suelos Ultisoles con infiltración muy rápida demora mucho tiempo que se arribe a una tasa de infiltración estable o básica. Por ello, en este caso particular se logró medir la tasa de infiltración instantánea, es decir la velocidad de infiltración de un cierto volumen de agua, sin llegar con esto a medir la tasa de infiltración tradicional ya que no se llega a la infiltración básica. El coeficiente de determinación R^2 fue de 45,02 % siendo su coeficiente de correlación de 0,670957 indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. La ecuación que ajusta el modelo es de tipo exponencial:

$$Ti \text{ mm min}^{-1} = \exp(2,29558 + 0,136802 * \text{COS \% } 0-0.1 \text{ m})$$

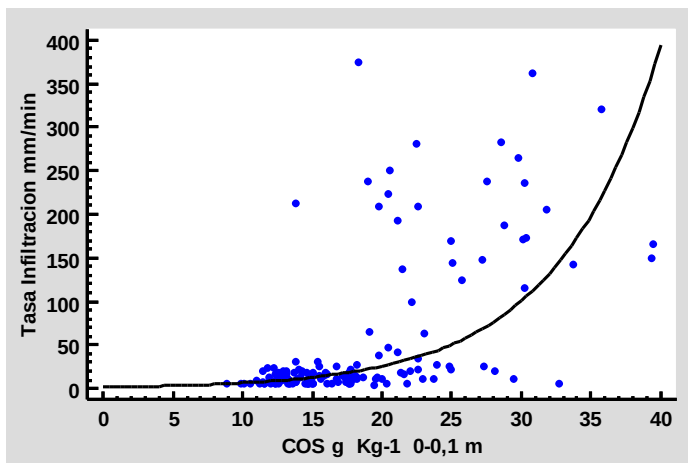


Figura 9. Gráfico de regresión simple entre la tasa de infiltración (T_i mm min^{-1}) y el contenido de COS del E1. R^2 45,02 y el valor de F 113,81.

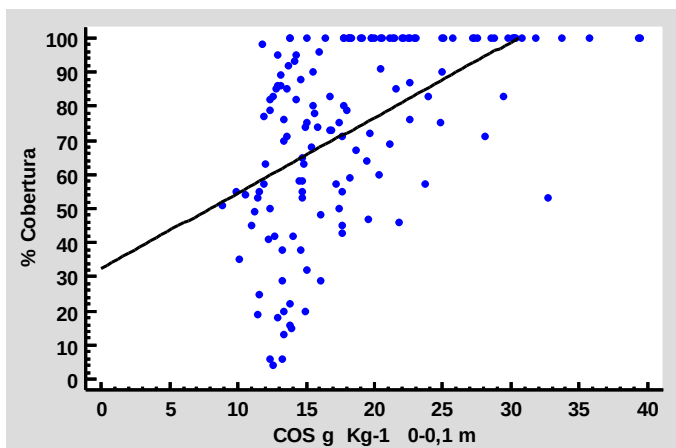


Figura 10. Gráfico de regresión simple entre el % de cobertura de suelo y el % de COS en el E1. R^2 27,06 % y el valor de F 51,27.

La relación cambió con valores más bajos o más altos que $\text{COS} = 20 \text{ g kg}^{-1}$. Con $\text{COS} < 20 \text{ g kg}^{-1}$, la infiltración varió dentro un rango de 5 a 50 mm min^{-1} . Arriba de ese umbral, los valores de infiltración fueron más dispersos, entre 50 y 350 mm min^{-1} .

En el Figura 10 se observa la relación entre la cobertura de suelo y el COS. Entre 10 y 15 g kg^{-1} de COS hubo gran variabilidad en la cobertura de suelo (4 a 100 %). Esta elevada variabilidad en el % de cobertura disminuyó (40 a 100%) en niveles de COS mayores que 15 g kg^{-1} . El coeficiente de determinación R^2 es de 27,06 % y el coeficiente de correlación de 0,520192, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. La ecuación que ajusta el modelo es lineal:

$$\% \text{ Cobertura} = 32,4752 + 2,21043 \cdot \text{COS \% } 0-0,1 \text{ m.}$$

Las siguientes figuras 11, 12 y 13 muestran las relaciones entre la Dap, el CDMP y el % de cobertura con la tasa de infiltración.

El estadístico R^2 indicó que el 39,34 % de la variabilidad de la Tasa infiltración fue explicado por la variación de la Dap, siendo el coeficiente de correlación igual a -0,63, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables (Figura 11). La ecuación del modelo ajustado es del tipo exponencial:

$$Ti \text{ mm min}^{-1} = \exp(7,55769 - 4,84398 * Dap \text{ Mg m}^{-3} \text{ 0-0,1 m}).$$

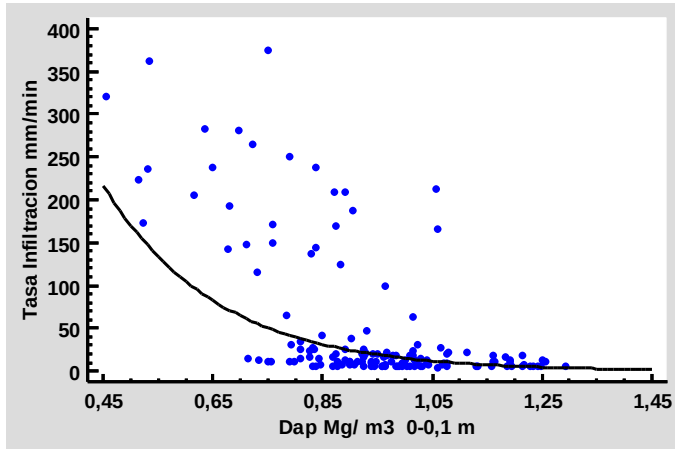


Figura 11. Gráfico de regresión simple entre la Tasa de infiltración y la Densidad aparente en el E1. R^2 39,34 % y el valor de F 90,15.

El estadístico R^2 indicó que el 36,79 % de la variabilidad de la Tasa infiltración fue explicado por la variación del CDMP, siendo el coeficiente de correlación igual a -0,606567, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables (Figura 12). La ecuación del modelo ajustado es del tipo exponencial:

$$Ti \text{ mm min}^{-1} = \exp(4,58133 - 1,1072 * CDMP \text{ mm 0-0,1 m})$$

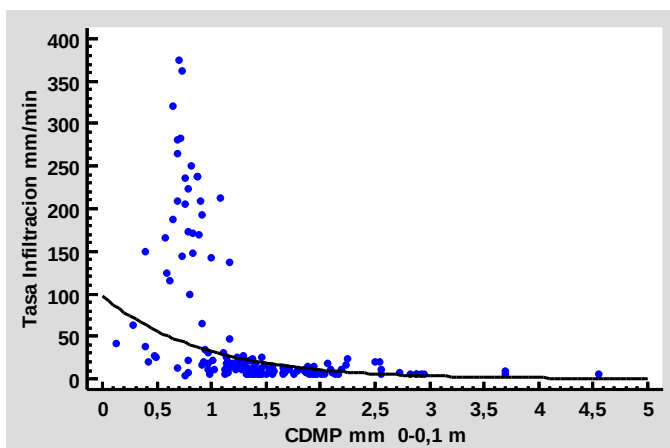


Figura 12. Gráfico de regresión simple entre la tasa de infiltración y el CDMP en el E1. R^2 36,79 % y el valor de F 80,91.

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica 49,74 % de la variabilidad en Tasa infiltración mm min^{-1} , siendo el coeficiente de correlación igual a 0,705295, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables (Figura 12). La ecuación del modelo ajustado es del tipo Cuadrado-Y Log-X:

$$\% \text{ Cobertura} = \sqrt{392,21 + 1883,05 \cdot \ln(Ti \text{ mm min}^{-1})}$$

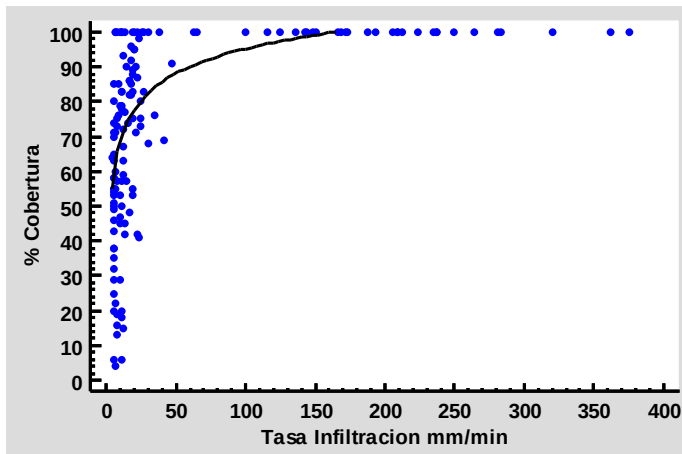


Figura 13. Gráfico de regresión simple entre el % de cobertura y la tasa de infiltración de agua en el E1. R^2 49,74 % y el valor de F 137,58.

La Ti varió siguiendo funciones exponenciales negativas con Dap y $CDMP$ (Figuras 11 y 12), mostrando en ambos casos valores umbral de las variables regresoras para separar rangos de baja y alta variabilidad de Ti .

Estos valores umbrales parecieron situarse en $Dap = 1 \text{ Mg m}^{-3}$ y en $CDMP = 1,2 \text{ mm}$. Lo mismo sucedió para la cobertura del suelo, que incrementó su variabilidad con valores de $Ti < 30 \text{ mm min}^{-1}$.

5. Discusión

Utilizando al COS como variable regresora, ninguna de las propiedades físicas medidas mostró una elevada relación con dicha variable. En efecto, sólo para el espesor E1 donde se tuvo un rango mayor de variación de COS, los coeficientes de determinación fueron algo más elevados en relación al espesor E2, pero con valores que en el mejor de los casos explicaron el 45% de la variabilidad de la propiedad física estudiada. Estas relaciones no muy estrechas no son extrañas de hallar en propiedades físicas, debido a multiplicidad de factores determinantes de la variación de la porosidad edáfica o de la entrada de agua al suelo (Taboada y Álvarez, 2008).

En los siguientes párrafos se discutirá sobre los resultados de las regresiones con cada una de las propiedades y características estudiadas.

La relación casi horizontal hallada entre la Dap y la H° (Figura 4) mostró un comportamiento rígido del suelo, lo cual concuerda con la baja expansibilidad de la arcilla caolinita prevaleciente en este suelo (Parker *et al.*, 1982). Este comportamiento rígido evitó la necesidad de estandarizar los valores de densidad a una humedad constante, tal como es necesario realizar en otros suelos del país que experimentan cambios de volumen (Taboada

et al., 1988). Pese a ello, los valores de Dap encontrados en ambos espesores fueron similares y tuvieron un rango de variación muy amplio (0,5 a 1,3 Mg m⁻³), propio del que tienen los suelos expansibles (Taboada *et al.*, 1988). Indudablemente, otros factores distintos que COS o H° fueron responsables de esta variación, como por ejemplo la creación o desaparición de porosidad por causas de manejo. Por el contrario autores como Salamanca y Sadeghian (2005), encontraron que la Dap presentó una elevada relación con los contenidos de materia orgánica y humedad de suelos tropicales colombianos, sin embargo los rangos de valores hallados y el aumento de la Dap con la profundidad son similares a los aquí encontrados.

En el E1 donde el R² fue más alto, se puede observar como en valores superiores a 20 g kg⁻¹ de COS, se encontraron pocas parcelas con valores de Dap superiores a 1 Mg m⁻³. De cualquier manera, aun cuando el COS fue menor a 10 g kg⁻¹, el valor máximo de Dap no superó 1,3 Mg m⁻³, en consonancia con la textura arcillosa del suelo. A diferencia de estos bajos valores de Dap hallados en YM, en parcelas de pino con diferentes manejos para su plantación, Von Walis *et al.*, (2014), en el norte de Misiones encontró valores de Dap de 1,32 a 1,45 Mg m⁻³, no habiendo relación con los contenidos de COS. Resulta evidente que el peso y pisoteo por tránsito de maquinarias en los manejos evaluados, influye en el sistema poroso del suelo más que el contenido de COS. Así mismo Toledo *et al.*, (2013), en la zona centro de Misiones obtuvo los siguientes valores de Dap y materia orgánica total en maíz, 1,09 Mg m⁻³ y 39,06 g kg⁻¹ en té fueron 1,46 Mg m⁻³ y 40,70 g kg⁻¹. Como se observa, a similares valores de materia orgánica total, los valores de Dap fueron muy diferentes, demostrando así la poca relación entre ellos en este tipo de suelo. Contrario a éstos resultados Soler da Silva *et al.*, (2006), encontró que la Dap aumento en profundidad, independientemente del sistema de manejo y que tuvo correlación negativa con el contenido de carbono orgánico (R= -0,70), lo cual es atribuible a la influencia de estos dos constituyentes orgánicos sobre la estabilidad del suelo. Es de resaltar que solo con valores altos de COS correspondientes a parcelas de selva, se obtuvieron valores muy bajos de Dap en el orden de los 0,3 a 0,7 Mg m⁻³, lo cual es atribuible a la presencia de mantillo forestal o broza.

El aumento del índice CDMP expresa la inestabilidad de agregados cuando son tamizados sucesivamente en seco y en agua. Este índice se relacionó con el COS en ambos espesores con coeficientes de determinación medianos a bajos y ecuaciones de tipo exponencial (Figuras 5 y 6). Según Bronick & Lal (2005), esta baja relación con el COS se explicaría porque la agregación es controlada por diversos factores en los distintos tipos de suelos, y en el caso de los Ultisoles, predomina el humus complejoado con el hidróxido de Al⁺³, que protegen a la MO de la descomposición microbiana y favorecen la agregación. En el E1 el CDMP presentó valores entre 3 y 0,3 mm con rangos de COS entre 10 y 40 g kg⁻¹. En el E2 la variación del CDMP fue similar (3 a 0,7 mm) pero con rangos de COS de 10 a 20 g kg⁻¹. En el E1, donde hubo mayor variabilidad de contenidos de COS, el valor de 20 g kg⁻¹ separó dos grupos: por debajo de dicho valor el aumento de inestabilidad fue de 0,7 a 3 mm de CDMP, pero por encima de 20 g kg⁻¹ la variación fue más estrecha y dirigida hacia una menor inestabilidad (1,4 a, 0,3 mm de CDMP). En prácticas de repoblación forestal, muestreando el suelo a los tres años y seis meses de instalado los tratamientos, Lupi *et al.*, (2007), obtuvo similares resultados de CDMP e incluso concluye que las pérdidas de COS, diferentes estadísticamente entre manejos, estuvieron acompañadas por una degradación de las condiciones físicas del suelo comprobados por el aumento del CDMP. Sin embargo, Von Walis *et al.*, (2014), encontró valores en un rango más estrecho (1,03 a 1,22 mm de

CDMP), sin encontrar diferencias entre los manejos con y sin remoción de suelo y quema de residuos e inclusive sin hallar correlaciones con el COS. Resultados similares fueron hallados por Fernández *et al.*, (2010). En la región pampeana Studdert *et al.*, (1997), encontró similar relación a los hallados en esta tesis entre el índice de estabilidad de suelos agrícolas y el COS en la capa superficial del suelo con un R^2 de 43%.

La similitud de rangos de CDMP entre estratos de suelo con diferentes contenidos de COS se debe a que en los primeros 10 cm de profundidad se encuentra la mayor cantidad de raíces de malezas, hongos y fauna del suelo. Estos organismos participan activamente en la formación y estabilización de macroagregados. En cambio en el E2, la presencia de estos agentes estabilizadores es menor (Degens, 1997; Beare, *et al.*, 1997). En ambos estratos hay una marcada predominancia de macroagregados que rompen a macroagregados menores. En estos rangos menores de agregación los procesos de estabilización comienzan a ser manejados por los óxidos del suelo, siendo su estabilización cada vez menos dependiente del COS pasando a depender, en cambio, de los agregantes inorgánicos (Six *et al.*, 2002).

La RM tuvo una relación muy baja con la H° en ambos espesores (Figura 7 y 8) y con coeficientes de correlación débil entre las variables. Además tampoco hubo relación con el COS en ambos espesores estudiados. En referencia a la falta de relación con la humedad, Alvares & Barraco (2005), llegaron a la misma conclusión en ensayos de larga duración en la región pampeana. La presencia de cobertura espontánea o malezas y sus raíces hacen un efecto remediador de la compactación producida en el suelo (Calegari *et al.*, 1993; Campos *et al.*, 1999; Derpsch 1999). El aumento de la RM estaría más relacionado con factores mecánicos antrópicos, sin embargo otros investigadores en regiones templadas opinan que los valores de RM están relacionados a la humedad presente al momento de los muestreos (Wilson *et al.*, 2006). En los Gráficos 7 y 8, se observa que por debajo del 25 % de humedad en el suelo hubo una enorme variabilidad de RM, mostrando la influencia de factores diferentes que H° en la determinación de RM, esta gran variabilidad también fue hallada por varios autores trabajando en suelos tropicales (Silva *et al.* 1994; Tormena *et al.*, 1998, 1999; Imhoff *et al.*, 2001) Generalmente en los suelos Ultisoles muestreados, las humedades suelen ser superiores a 25%, incluso hasta los 40 %. En este rango de H° , los valores de RM suelen estar por debajo de 2 MPa, valor que no es limitante para la exploración de raíces (Glinski & Lipiec, 1990).

Los valores de Ti fueron de por sí muy elevados, mostrando que con la metodología usada muy probablemente no se llegó a alcanzar la infiltración básica del suelo y por esto los valores son elevados. Sin embargo a criterio personal, se trata de una cuestión de escalas o magnitudes, pero no deja de demostrar la respuesta de acuerdo a los manejos y calidad del suelo de las parcelas muestreadas respecto a la velocidad de infiltración del agua.

De todas las propiedades estudiadas, la Ti se relacionó más fuertemente con el COS, el cual explicó el 45 % de la variación de Ti (Figura 9). En efecto, Von Walis (2013), halló una correlación del 68% entre la tasa de infiltración y el COS en plantaciones forestales.

Los valores de COS estuvieron en parte relacionados con la cobertura superficial del suelo (Figura 10), la cual mostró que sólo con cobertura del 100% se alcanzaron valores de COS mayores a 15 g kg⁻¹ (Figura 10). Con contenidos más bajos de COS, la cobertura fue muy variable (10 a 100%). Esto tuvo que ver con el momento de muestreo, además cabe aclarar que el dato que se releva no es el aporte en kg de materia seca el cual si estaría relacionado más fuertemente con el COS.

La relación de Ti con propiedades como Dap, CDMP y la cobertura del suelo, fueron de 39 %, 37 % y 50 % respectivamente todas con coeficientes de correlación moderadamente fuertes. En la región pampeana Castiglioni *et al.*, (2006), también encontraron mayor correlación de la Ti con el COS (R^2 89%), que con la Dap (R^2 79%). Como puede observarse, los coeficientes de determinación encontrados por este autor fueron mayores, denotando una mayor asociación entre estas variables.

Con el aumento de la densidad del suelo o pérdida de porosidad, los macroporos son la categoría de poros más afectada (Carter, 1990). Estos poros son los que gobiernan el flujo saturado del agua en el suelo. Varios autores mencionaron una drástica reducción en la conductividad hidráulica saturada ante incrementos en la compactación del suelo (Horton *et al.*, 1994; Guerif *et al.*, 2001; Lipiec & Hatano, 2003 y Venialgo *et al.*, 2004).

Los resultados hallados en Ultisoles de Misiones expresan que hay un porcentaje de la variación de la Ti que no es explicada por las variables medidas, según Rojas 1997, la presencia de los óxidos y sesqui-óxidos en la matriz del suelo podrían explicar en parte que el conjunto de propiedades físicas mantiene una aceptable velocidad de infiltración del agua.

6. Conclusiones

Los resultados de este capítulo permitieron demostrar la relación existente entre el carbono orgánico del suelo y diferentes propiedades físicas. Las variaciones que se producen en la mayoría de las propiedades físicas fueron explicadas por el COS con relaciones entre un 25 y 45 %, de manera significativa y correlaciones moderadamente fuertes. Este resultado no aporta suficientes evidencias para rechazar totalmente la hipótesis de trabajo.

La tasa de infiltración instantánea elevada de estos suelos se debe al conjunto de propiedades físicas estructurales del suelo, además del COS, pero sin dudas no es dependiente de algún factor en particular. Se concluye que las características de la matriz mineral del suelo fueron determinantes de la elevada tasa de infiltración.

Capítulo V

Indicadores de calidad de suelo en Ultisoles.

1. Introducción.

El uso de los suelos y las prácticas de manejo marcan principalmente la dirección y el grado de los cambios en su calidad, en el tiempo y en el espacio. Interpretar y predecir estos cambios a través de indicadores confiables y sensibles constituye una de las principales finalidades de la moderna ciencia del suelo. Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante (Cantú *et al.*, 2007).

En la actualidad existe interés en identificar indicadores de calidad de suelo que logren: a) integrar procesos y propiedades físicas, químicas y/o biológicas, b) ser aplicados bajo diferentes condiciones de campo, c) complementar bases de datos ya existentes o datos fácilmente medibles y d) responder a cambios en el uso del suelo, a prácticas de manejo y a factores climáticos o humanos (Doran & Parkin, 1994). Monitoreando los cambios en el tiempo de los indicadores de calidad de suelo se podría determinar si un sistema de manejo está en una situación de estabilidad, mejora o degradación (Shukla *et al.*, 2006).

La evaluación de la sustentabilidad de un sistema de manejo se puede realizar comparando dicho sistema en relación a otros alternativos conducidos al mismo tiempo (Larson & Pierce, 1994; Beare *et al.*, 1997). Bolinder *et al.*, (1999) señalaron que la respuesta que se obtiene de distintos indicadores de la calidad del suelo a diferentes prácticas de manejo resulta clave para identificar aquellos más sensibles, como se llama en inglés “*robust minimum data set*” (conjunto mínimo y robusto de datos o CMD).

1.1 Antecedentes específicos.

Varios autores sostienen que deberían seleccionarse y cuantificarse un número mínimo de características de suelo con el fin de evaluar la calidad (Larson & Pierce, 1994; Govaerts *et al.*, 2006). En este sentido, se han propuesto diferentes características de suelo que incluyen propiedades tales como: MOS, capacidad de infiltración, estabilidad de los agregados, sellado superficial, porosidad, pH, densidad aparente, resistencia a la penetración, salinidad, textura, capacidad de almacenamiento de agua, nitrógeno, fósforo disponible, biomasa microbiana y respiración del suelo (Karlen & Stott, 1994; Doran & Parkin, 1996; Aparicio & Costa, 2007).

En el país sobre todo con cultivos anuales se han hecho muchas investigaciones buscando el CMD. Ejemplo de ellos son los trabajos realizados por Wilson *et al.*, (2008) seleccionando CMD para diferentes zonas de la Provincia de Entre Ríos, determinó que el contenido de carbono orgánico total y el índice de inestabilidad fueron incluidos en todos los CMD. Además, observó que en sistemas ganaderos y agrícolas de secano, la porosidad total y la densidad de suelo mostraron alta sensibilidad. La resistencia mecánica logró marcar diferencias entre los tratamientos, pero se mostró muy dependiente de las condiciones hídricas de los suelos (Wilson *et al.*, 2006).

La utilidad que presenta el valor determinado por un indicador es potenciado si además se cuenta con una tabla de referencia que califique dichos indicadores, para este fin, Sosa 1992, evaluó la relación de contenidos de nutrientes en el suelo y en planta con la producción de yerba mate, encontrando una falta de relación entre ellos debido principalmente a la diversidad de formas de cosecha y manejos de suelo. Sin embargo confeccionó con los datos obtenidos un análisis descriptivo que propone una escala de contenidos de nutrientes en el suelo con intervalos de referencia, muy bueno, bueno, regular y malo. (Echeverria & Garcia, 2014).

1.2 Estado del arte en Ultisoles de Misiones.

No son muchos los trabajos sobre indicadores de calidad de suelo realizados en suelos lateríticos de Misiones. Sin embargo se puede citar a autores como Fernández *et al.*, (2010), en ensayos sobre manejo de residuos en plantaciones forestales. Estos autores no encontraron diferencias significativas para el carbono entre ninguno de los tratamientos, los cuales incluían, quema, incorporación y cobertura de residuos o “*mulching*”, entre otros. En el mismo ensayo el índice de inestabilidad estructural (CDMP) se vio afectado por el laboreo y la extracción de residuos en superficie (Lupi, *et al.*, 2002). Buscando indicadores de calidad de suelo para uso citrícola en suelos Oxisoles de Misiones, Dalurzo *et al.*, (2005), determinaron que los atributos: carbono orgánico, nitrógeno total, actividad de la fosfatasa ácida, nitrógeno potencialmente mineralizable, materia orgánica particulada y respiración del suelo, son indicadores sensibles de la calidad del suelo. En diferentes sistemas de labranza en YM la medida de la estabilidad de agregados mediante el CDMP resultó un buen indicador de la calidad de los suelos (Venialgo *et al.*, 2002). También fue un buen indicador del efecto del cambio de uso del suelo entre la selva nativa y cultivos como YM, Té y forestación de Pinos (Barbaro *et al.*, 2014).

2. Objetivos e hipótesis.

Objetivo: Establecer un conjunto mínimo de indicadores de calidad física de suelo, que sean suficientemente sensibles para distinguir distintos manejos implementados en YM.

Hipótesis; Dado el clima extremo (altas lluvias y temperaturas) al que están sujetos estos suelos rojos subtropicales, la conservación de la materia orgánica, la estabilidad de la estructura y altos valores de infiltración son esenciales para evitar procesos erosivos. El CMD está integrado por alguna o todas estas variables, sensibles a los manejos con remoción de suelo y sin remoción utilizados en el capítulo III de esta tesis.

2.1 Objetivos e hipótesis específicos.

El monitoreo de suelos sensibles a la erosión es primordial, por tanto se hace necesario conformar una tabla con intervalos de referencia de los indicadores de suelo para ayudar al diagnóstico de situaciones y recomendar las prácticas de mitigaciones necesarias.

La hipótesis sugiere que los intervalos hallados para cada clase de calidad de suelo se relacionan con los valores hallados en los manejos evaluados en el capítulo III de esta tesis.

3. Materiales y métodos.

3.1 Caracterización de los sitios

Se trabajó con el grupo 2 de parcelas, donde se incluyeron las 47 parcelas empleadas en esta tesis. La localización de las mismas se puede ver en la Tabla 1 del capítulo II, mientras que los manejos de cada parcela y la calidad cualitativa de las mismas se observan en la Tabla 1 del capítulo IV.

3.2 Determinaciones específicas.

Se emplearon para este capítulo las muestras extraídas solo del espesor 1, es decir de 0 a 0,10 m. A esta profundidad se determinó la mayor cantidad de propiedades físicas. Las parcelas fueron agrupadas de la siguiente manera, CON REMOCIÓN (rastra) SIN REMOCION (macheteo y herbicida) y SELVA.

Los indicadores evaluados fueron: COS, Dap, PT, CDMP, RM, TI y % cobertura, cuyas metodologías fueron descriptas en el capítulo II punto 3.

También se utilizó como posible indicador la calidad cualitativa de las parcelas, cuyos datos figuran en la Tabla 1 del capítulo IV, los criterios de calificación de ésta calidad cualitativa esta explicados en el capítulo IV punto 3.1.

Se realizará un análisis de distribución de frecuencias con todos los indicadores de suelo analizado, además se propone una escala (Sosa, 1992) con intervalos de referencia, malo, regular, bueno y muy bueno. Los valores dentro de éste intervalo tomaran un orden descendente o ascendente dependiendo de la propiedad de suelo analizada.

3.3 Diseño estadístico.

Para la selección de los indicadores que van a integrar el CMD se realizó un análisis de componentes principales (ACP), para seleccionar los indicadores se tuvo en cuenta los siguientes criterios: A) Valor de las correlaciones positivas o negativas con otras variables (Tabla 1). B) peso estadístico en la explicación de la variabilidad, es decir el valor del autovector (Tabla 2). Además de los criterios A y B se tuvo en cuenta para el armado del CMD la objetividad de la valoración del indicador en la medición.

Para el análisis de la distribución de frecuencia e intervalos de referenciase utilizó el programa estadístico Infostat.

4. Resultados.

A continuación se presentan los resultados del análisis de componentes principales. Para ello, se optó por clasificar las 47 parcelas de estudio de acuerdo a la remoción de suelo para el control de las malezas y las parcelas correspondientes a selvas. Las parcelas de selva se consideraron como tales, en el Figura 1 Bi-plot.

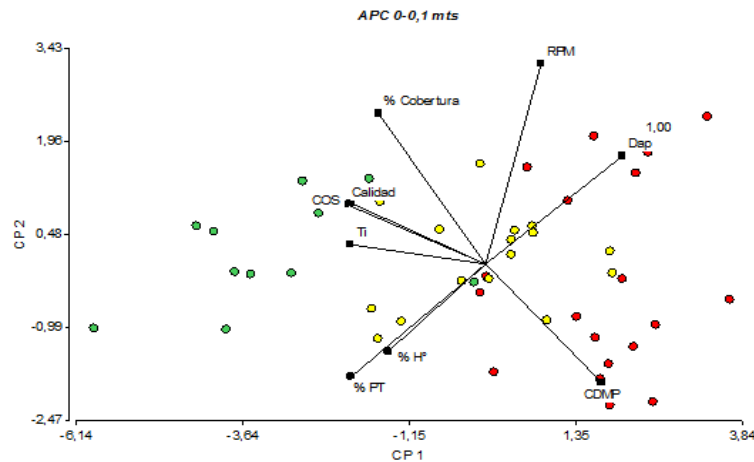


Figura 1. Bi-plot del ACP para los indicadores de calidad de suelo propuestos clasificados por el manejo de suelo para el control de malezas. Los puntos de color verde representan las parcelas de selva, los amarillos son parcelas sin remoción de suelo y los puntos rojos son parcelas con remoción de suelo.

Tabla 1 Matriz de correlación entre los indicadores evaluados.

	Calidad	CDMP	% H°	Dap	COS	% PT	RM	% Cob	Ti
Calidad	1,00								
CDMP	-0,61	1,00							
% H°	0,39	-0,29	1,00						
Dap	-0,60	0,54	-0,55	1,00					
COS	0,76	-0,65	0,49	-0,61	1,00				
% PT	0,59	-0,53	0,55	-1,00	0,59	1,00			
RM	-0,33	-0,02	-0,26	0,39	-0,14	-0,39	1,00		
% Cob	0,76	-0,60	0,32	-0,33	0,58	0,32	-0,07	1,00	
Ti	0,80	-0,53	0,38	-0,70	0,72	0,69	-0,22	0,54	1,00

Tabla 2. Valores de los autovectores CP1 y CP2 de los indicadores en evaluación. Muestran los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar las CP1 y CP2.

Variables	CP1	CP2
Calidad cualitativa	-0,39	0,18
CDMP mm	0,32	-0,34
% H° g/g	-0,27	-0,25
Dap Mg/ m ³	0,38	0,32
COS g Kg ⁻¹	-0,37	0,18
% Poros Totales	-0,37	-0,33
RM Mpa	0,15	0,59
% Cobertura	-0,30	0,44
Ti mm min ⁻¹	-0,38	0,06

Tabla 3. Valores de los autovalores. En esta tabla se pueden ver los autovalores asociados a cada autovector la proporción de variabilidad total explicada por cada componente (autovalores) y la proporción de la variabilidad total explicada, en forma acumulada

<u>Lambda</u>	<u>Valor</u>	<u>Proporción</u>	<u>Prop Acum</u>
1	5,17	0,57	0,57
2	1,33	0,15	0,72
3	0,80	0,09	0,81
4	0,65	0,07	0,88
5	0,44	0,05	0,93
6	0,32	0,04	0,97
7	0,18	0,02	0,98
8	0,10	0,01	0,99
9	0,00	0,00	1,00

El análisis de componentes principales permitió cuantificar el efecto de los distintos sistemas de manejo de malezas sobre las propiedades del suelo. Los dos primeros componentes principales explicaron el 72% de la variabilidad total, CP1 57% y CP2 15% permitiendo la representación gráfica de todas las propiedades medidas en un mismo plano (Figura 1). Este gráfico muestra cómo se correlacionan propiedades físicas como la RM, Dap y el CDMP con los manejos con remoción de suelo. Por otro lado el % Cobertura, Calidad cualitativa, COS, Ti y PT se asociaron a situaciones de selva y sin remoción de suelo.

El ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas. En la matriz de correlación (Tabla 1) se observaron las siguientes correlaciones: 70 al 80% se correlacionó la calidad cualitativa con el COS, el % de cobertura, la Ti y además el COS y la Dap con la Ti. Con el 60% al 70% se correlacionó la calidad cualitativa con el CDMP y la Dap. El CDMP con el COS y % de cobertura. La Dap con el COS. El % PT con la Ti. Las demás correlaciones se encuentran por debajo de estos valores.

Cada propiedad de suelo está representada por un autovector que queda definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la CP considerada. La Tabla 2 indica los valores de los autovectores. En la misma se resaltan los siguientes grupos: con valores negativos en e1, la calidad cualitativa, COS, % PT y la Ti, con valor positivo se encuentra el CDMP y la Dap. En el e2 con valores negativos resalta el CDMP y el %PT, y con valores positivos Dap, RM y la Cobertura del suelo.

De acuerdo con los valores de los autovectores y las correlaciones, se preseleccionaron a: el COS, Ti, Dap, CDMP, Calidad cualitativa y % Cobertura.

De acuerdo a la objetividad de la medición se descarta como indicador a la Calidad cualitativa, ya que depende mucho del observador, por lo que es muy subjetiva. También se descarta la cobertura del suelo, ya que depende del momento en el que se mida, si las condiciones climáticas fueron buenas o no para el desarrollo de las malezas, y demás factores no controlables. La Dap varía dentro de un rango muy estrecho de valores, por lo que también es descartada como indicador.

Como se explicó en capítulos anteriores la tasa de infiltración se refiere en ésta tesis a la infiltración instantánea expresada en mm min^{-1} (o velocidad de infiltración), haciendo esta salvedad, creo importante incluir a la Ti como un indicador dentro del CMD, si bien en el

capítulo 3 no arrojó diferencias estadísticamente significativas, si presentó valores absolutos muy diferentes entre sistemas de labranza, es decir que simplemente haciendo un muestreo con más repeticiones se tendrá un valor más confiable.

El conjunto mínimo de datos quedó, por lo tanto, integrado por el COS, CDMP y la TI.

A continuación se presenta la distribución de frecuencia de los valores de cada indicador teniendo en cuenta cuatro clases, los valores pueden ir en forma ascendente o descendente dependiendo del significado que tengan en particular. Se optó por marcar con un asterisco la clase más frecuente (Frecuencia relativa) de cada indicador. Los valores comprendidos en la clasificación MALA, generalmente fueron de parcelas manejadas con rastra y los valores dentro de la clasificación muy buena generalmente son de selva.

Tabla 4. Valores de referencia en intervalos de los indicadores utilizados en el E1 de 0 a 0,10 mts

INDICADOR	MALO	REGULAR	BUENO	MUY BUENO
COS fac oxi g Kg^{-1}	< 17*	17-24	24-32	> 32
CDMP mm	> 2	2-1,5	1,5-0,8*	< 0,8
Ti mm min^{-1}	< 8	8-17*	17-33	> 33
Dap Mg m^{-3}	>1,2	1,2-1	1-0,8*	< 0,8
% PT	< 50	50-60	60-70*	> 70
% Cobertura	< 30	30-50	50-75	> 75*
RM MPa	> 2	2-1,4	1,4-0,7	< 0,7*

5. Discusión.

El COS y el CDMP nos indican cuestiones estructurales del perfil y la TI nos revela cómo está funcionando la entrada de agua al suelo. Con este CMD logramos tener una idea del funcionamiento estático y dinámico del sistema. (Haberern, 1992). De estos tres indicadores dos de ellos (el COS y la TI) coinciden con los siete indicadores propuestos por Larson & Pierce (1991), quienes además citan como integrantes del conjunto mínimo de datos al suministro de nutrientes, el carbono lábil, la textura, el agua disponible, la estructura (densidad aparente y conductividad hidráulica), la resistencia a la penetración, la profundidad de raíces, el pH y la conductividad eléctrica.

La elección del COS como un indicador de la calidad también fue sugerida por Toledo *et al.*, (2013), en Oxisoles de Misiones, al igual que Dalurzo *et al.*, (2005), trabajando en plantaciones de Citrus en suelos rojos del sur de la provincia. Mediante la técnica de estabilidad estructural se pueden evaluar varios aspectos relacionados al suelo, ya que a través de la misma se tiene en cuenta la porosidad (macro y microporosidad), el carbono orgánico y la actividad biológica, desde el punto de vista de la generación de poros y de la humificación de la materia orgánica (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004). La selección del CDMP como indicador dentro del CMD es coincidente con trabajos llevados a cabo en Brasil (Soler da Silva *et al.*, 2006) y en Misiones (Pícolo, *et al.* 1997; Venialgo *et*

al., 2002; Barbaro et al, 2014). En todos ellos, el CDMP resultó ser un buen indicador del uso y prácticas de manejo de suelo.

Como se mencionó en capítulos anteriores haciendo la salvedad metodológica de la tasa de infiltración y expresando en velocidad de infiltración de 2,5 cm de agua, se obtuvo un indicador eficiente de la calidad funcional del suelo. Por los elevados riesgos de erosión hídrica que hay en toda la provincia es importante contar con éste indicador dentro del CMD. Al evaluar la infiltración en diferentes manejos de suelos subtropicales del Chaco, Venialgo *et al.*, (2004), hallaron resultados coincidentes con el método del cilindro simple y el infiltrómetro de discos, aunque en estos suelos muy drenados no siempre se ha llegado a medir la infiltración básica (Von Wallis, 2013).

La importancia de establecer valores críticos o valores guías de indicadores para un tipo de suelo (Tabla 3), redundante en proveer información a partir de la cual sea posible diagnosticar la necesidad de introducir manejos recuperadores de suelo (Orellana & Pilatti, 1994). La clasificación propuesta y valores umbrales o críticos presentados en este capítulo responden a esta necesidad. Sosa (1992 y 2014), realizó una clasificación similar a la propuesta en esta tesis, pero en su caso relaciona la MO fácilmente oxidable en el contexto de la fertilidad química del suelo y los rendimientos de la YM. Estos autores, propusieron la siguiente clasificación ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$): Malo 1-2.09 % Regular 2.10-2.70% Bueno 2.71-3.50% Muy Bueno $>3.5\%$.

Los rangos de variación de la Dap hallados en esta tesis fueron más estrechos que los encontrados en Ultisoles de Costa Rica por Alvarado & Forsythe (2005), quien encontró Dap desde 0.53 a 1.82 Mg m^3 . En cafetales de Colombia Salamanca & Sadeghian (2005) sostienen que la baja Dap de los suelos (0.96 Mg m^3) se debe a que por ser de grano fino los basaltos originan texturas arcillosas que aumentan la proporción de poros totales (63,61 %). Esta interpretación es coincidente con la de esta Tesis.

Una clasificación similar a la presentada para la RM fue hallada por Forsythe & Tafur (1985), quienes presentaron la siguiente evaluación: 0-0.6 MPa excelente; 0.7 - 1.2 MPa aceptable; 1.3 - 2.5 MPa no aceptable y $>2.5 \text{ MPa}$ no hay penetración por las raíces.

6. Conclusiones

El CMD quedó conformado por el COS, el CDMP y la Ti, lo cual no brinda evidencia suficiente para rechazar la hipótesis planteada.

La clasificación y los intervalos de referencia propuestos de los indicadores analizados en este capítulo servirán como orientadores de las prácticas de manejo de conservación de suelo a realizar en las parcelas de cultivo. Es más frecuente encontrar buenas condiciones físicas de suelo y bajos contenidos de COS.

CAPÍTULO VI

Conclusiones generales y recomendación agronómica

1. Situación motivadora.

Durante algunos años de trabajo en el campo, muestreando el suelo para diversos ensayos, se presentaron situaciones donde los indicadores muestreados no tenían una clara relación entre ellos. Por ejemplo, se esperarían las siguientes relaciones: baja densidad de suelo y alto contenido de materia orgánica, o que los suelos manejados de manera convencional con rastra de disco predisponen malas condiciones estructurales y, por el contrario, en los suelos manejados sin labranza se esperaría altos contenidos de materia orgánica y buenas condiciones estructurales. Ello condujo a plantearse preguntas acerca de la calidad estructural del suelo: ¿Depende ella del sistema de control de malezas? o ¿Cuánto afecta a la calidad del suelo el cambio de uso de selva a plantaciones de yerba mate? ¿Qué grado de influencia tiene el COS sobre la calidad estructural de los suelos con uso yerbatero? ¿Qué indicadores podrán reflejar mejor la calidad de los Ultisoles?

A la hora de asesorar y realizar recomendaciones, el técnico o asesor tiene que estar convencido y contar con respaldo científico que avalen estas propuestas. Sin embargo, hasta el presente, la bibliografía respecto a estos temas es muy contradictorio y escaso, lo que ha motivado a la realización de esta tesis.

2. Conclusiones generales

Las preguntas antes mencionadas encontraron su respuesta en los capítulos planteados en esta tesis. Cada uno de los capítulos trató temas específicos, logrando llegar a los objetivos propuestos, con hipótesis en general no rechazadas. Las principales conclusiones de esta tesis son:

- El control de malezas con macheteadora es el que generó las mayores ganancias de COS en porcentaje y stock, y mejores condiciones físicas en el perfil, en comparación con los manejos de malezas con herbicida y rastra, diferenciándose de ellos sobre todo en los primeros veinte centímetros del perfil.
- Con respecto a la situación original de selva, el control con macheteadora generó las menores pérdidas de calidad estructural y carbono orgánico del suelo. Hubo estratificación del COS acumulándose en los primeros diez centímetros de suelo.
- El control de malezas con herbicida mantuvo bajos valores en términos de stock de carbono, pero fueron similares a los manejos con rastra. Sin embargo, con herbicida las propiedades físicas mostraron una calidad aceptable pero inferior a la del manejo con desmalezadora.
- Las pérdidas de stock de carbono con el control de malezas con herbicida respecto a la selva se evidenciaron mayormente en los primeros diez centímetros. Las propiedades físicas mostraron deterioros semejantes a las del control con

desmalezadora. Hubo estratificación del COS en los primeros diez centímetros del suelo.

- El control de malezas con rastra tuvo los menores valores de stock de carbono, sobre todo en los primeros veinte centímetros del perfil. Respecto a las propiedades físicas, en comparación a los otros dos controles de malezas el control con rastra tuvo un efecto perjudicial de la calidad estructural, a excepción de la densidad y la resistencia mecánica.
- La pérdida de stock de carbono de la rastra respecto a la selva fue general y elevada en todo el perfil. En los primeros diez centímetros se produjo el mayor aumento de densidad aparente y la mayor caída de la estabilidad de agregados en comparación a la selva. Las demás propiedades medidas también fueron perjudicadas afectando la calidad estructural del perfil. No hubo con rastra una marcada estratificación del COS.
- El cálculo de stock de carbono considerando el espesor de suelo equivalente resultó ser más adecuado, pues aisló el efecto de los cambios de densidad aparente.
- Las variaciones que se producen en la mayoría de las propiedades físicas fueron explicadas por el COS con relaciones entre un 25 y 45 %, de manera significativa y correlaciones moderadamente fuertes. En éste contexto y siguiendo un orden descendente en la relación con el COS, se encuentra la tasa de infiltración, estabilidad de agregados, densidad aparente y % cobertura. Las mayores relaciones se producen en los primeros 10 centímetros de profundidad.
- No hubo relación entre el carbono orgánico del suelo y la resistencia mecánica, por lo que el aflojamiento del suelo no parece depender de aumentar el nivel de COS.
- La relación de TI con variables como Dap, CDMP y la cobertura del suelo, fueron de 39 %, 37 % y 50 % respectivamente todas con coeficientes de correlación moderadamente fuertes.
- La metodología empleada para medir la tasa de infiltración en estos suelos de rápido drenaje no ha llegado a medir la infiltración básica, por lo que sólo reflejó la infiltración instantánea. Los datos utilizados fueron la velocidad de infiltración de una lámina de agua de 25 mm transformados a mm min^{-1} .
- El conjunto mínimo de datos quedó conformado por tres indicadores de suelo, a saber: carbono orgánico, cambio del diámetro medio ponderado y la tasa de infiltración (con la aclaración antes mencionada).

3. Principales hallazgos.

- No se han encontrado en general valores extremos que hagan suponer problemas graves de compactación o mala calidad estructural, presentando los suelos con plantaciones de yerba mate un estado bueno o regular de degradación.
- En esta zona subtropical con cultivo de yerba mate, la labranza cero *per se* y manejo conservacionista no pueden ser considerados sinónimos, pues si bien en el manejo de malezas con herbicida se realiza sin remoción, el material vegetal o residuo dejado en superficie es escaso. Los resultados de la tesis muestran que la calidad estructural de este manejo sin remoción es inferior al manejo con desmalezadora.

- Los coeficientes de determinación mostraron que entre un 25-45% de la variación de la calidad estructural y física estuvo relacionada al carbono orgánico del suelo. El resto se podría atribuir a la matriz inorgánica de este tipo de suelos, compuesta por óxidos e hidróxidos de Fe y Al, y posiblemente a compuestos orgánicos no detectables con la técnica de análisis empleada en esta tesis.

4. Recomendaciones agronómicas

El deterioro físico estructural del suelo tiene implicancias directas en la funcionalidad del sistema “planta-ambiente-suelo”. Algunos daños colaterales relacionados a estos tres elementos del paisaje agroecológico son: impactos en el rendimiento de los cultivos, contaminación ambiental y pérdida de suelo.

En ambientes tan agresivos como los de Misiones la decisión sobre el manejo del suelo y las malezas impacta automáticamente sobre la sustentabilidad del sistema, sin treguas ni esperas.

Para el control de las malezas en las plantaciones de yerba mate que se encuentran en producción se recomienda utilizar la macheteadora. De esta forma “manejamos el suelo vivo” La macheteadora puede ser de tiro, con enganche de tres puntos del tractor o portátil como la motoguadaña.

Además de los efectos sobre la estructura y el aporte de carbono analizados en esta tesis, el desmalezado mecánico deja viva a la mayoría de las cubiertas espontáneas (mal llamadas malezas). Con este manejo el suelo se mantiene vivo, diverso en especies con protección contra las lluvias. La presencia de raíces vivas aporta continuamente agentes cementantes como la glomalina, que actúan de anclaje del suelo, airean y reciclan nutrientes, entre otros beneficios. La función de anclaje del suelo es muy importante por las pendientes elevadas donde se hallan las plantaciones de YM. La protección al suelo es doble: por un lado los restos del vegetal cortado quedan sobre la superficie y, por otro lado, el resto de la planta aún mantiene un porcentaje de tallos y hoja que protegen al suelo.

Como recomendación práctica, en el caso que se junten muchos restos de vegetal debido quizás a que las malezas estaban muy altas, conviene pasar en sentido contrario al del primer corte para volver a cortar el material y desparramar mejor sobre el suelo. La altura de corte no debería ser menor a 20 cm de altura, para que las malezas no sean tapadas por los restos cortados. La altura de las malezas para entrar a controlarlas es variable, pero promediando el metro de altura se logra buenos aportes de materia orgánica (entre 3000 y 5000 kg de materia seca, datos personales no publicados), las malezas protegen el pisoteo de las ruedas del tractor y se disminuye el número de pasadas anuales.

Capítulo VII

Bibliografía

Los autores citados en esta tesis se encuentran en el siguiente listado bibliográfico, los mismos están ordenados alfabéticamente y para un mismo autor de manera descendente en año de publicación.

- Acevedo, E. & Martínez, E., 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos. Sustentabilidad en Cultivos Anuales. Santiago, Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N ° 8. 13-25p.
- Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Fiorin, J.E.; Ruedell, J.; Petrere, C. & Fontinelli, F. Rotação de 1995. Culturas e sistemas de manejo do solo: Efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras.Ci. Solo, 19:115-119.
- Alekseeva, T.V; Sokolowska, Z; Hajnos, M; Alekseev, A.O & Kalinin, P.I. 2009, published in Pochvovedenie, 2009, No. 4, pp. 452–462.
- Alvarado, A & Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. Agronomía Costarricense 29(1): 85-94.
- Alvarez R; Berhongaray, G; De Paepe, J; Mendoza, MR; Steinbach, H; Caride, C & Cantet, R .2012. Productividad, fertilidad y secuestro de carbono en suelos pampeanos: efecto del uso agrícola anuales de la academia nacional de agronomía y veterinaria. Tomo l xvi. pag. 381-426.
- Alvarez R & Steinbach H. 2006. En Materia Orgánica: Valor agronómico y dinámico en región Pampeana. 1ª ed. UBA.256p.
- Alvarez,C.R; Taboada, M.A; Gutiérrez Boem, F.H; Bono, A; Fernández, P.L & Prystupa, P. 2009. Properties topsoil affected by tillage systems in Pampa Argentina in Soil Science Society of America J. 73:4: 1242-1250.
- Alvarez, C & Barraco, M. 2005. Indicadores de calidad de suelos. INTA. General Villegas. Buenos Aires Norte. Boletín Técnico N°4.
- Amado, TJC; C Bayer; PC Conceição; E Spagnollo; B Costa de Campos & M da Veiga. 2006. Potential of carbon accumulation in not-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. J. Environ. Qual. 35: 1599-1607.
- Amézquita E. 1998. Memorias “Encuentro Nacional de Labranza de Conservación”, Gabriel Romero C., Diego Aristizábal Q. y César A. Jaramillo S. (editores), Villavicencio, 1998.145-174p.
- Angers, D.A; Voromey, R.P & Coté, D., 1995. Dynamic of soil organic matter and corn residues effected by tillage practices. Soil Sci. Soc. Am. J 59: 1311-1315.
- Araujo De Medeiros, G; Freitas Lucarelli, J.R & Daniel, L.A. 2002. Influência do sistema de preparo sobre as características físicas de um latossolo vermelho. Memorias. XII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y II Foro de la Agroindustria del Mezcal. Oaxaca, México.
- Aparicio, V & Costa J.L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. Soil Tillage Res. 96: 155-165.
- Arshad, M. A. & Coen G. M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. American Journal of Alternative Agriculture N°7: 25-31p.

- Assis, R. L. & Lanças, P. K. 2005. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distrófico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, N° 29, 515 – 522p.
- Atwell, B. J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* N° 33(1): 27-40p.
- Barbaro, S & Ohashi, D. 2011. Evaluación de Avena strigosa S. y Visia sativa L. como cubiertas verdes en suelos típicos de la Provincia de Misiones. En: *Compartiendo Tecnología*. EEA Cerro Azul, INTA. p23.
- Barbaro, S & Sosa, A. 2011. Caracterización de las constantes hídricas de suelos bajo cultivo de yerba mate (*Ilex paraguariensis* st. hil. 1822) Congreso Sudamericano de la Yerba Mate. Libro de Actas.
- Barbaro, S; Sosa, A & Iwasita, B. 2014. Cambios de uso del suelo: su efecto en la estabilidad estructural en Ultisoles. XXIV Reuniones Científicas, Tecnológicas y de extensión de la FCA UNNE Corrientes.
- Barbaro, S & Sosa, A. 2014. Influencia del manejo de suelo sobre la porosidad en Ultisoles de la Provincia de Misiones y noreste de Corrientes. XXIV Reuniones Científicas, Tecnológicas y de extensión de la FCA UNNE Corrientes.
- Bauer, A & Black, A. L., 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 185-193. That maintain soil functions. *Agron. J.* 94, 38-47p.
- Baver, L. D; Gardner W. H, & Gardner W. R. 1991. *Física de Suelos*. Limusa. México. 529 p.
- Beare, M.B; Hu, S; Coleman, D.C. & Hendrix, P.F. 1997. Influences of mycelium fungi on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Applied Soil Ecology*, 5, 211-219.
- Bengough, A. G. 1991. The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth. In: Smith, K. A., and CH. Mullins (eds). *Soil Analysis. Physical Methods*. Marcel Dekker, Inc. New York. 431-445p.
- Bertol, I; Albuquerque J. A ; Leite D ; Amaral A. J & Zoldan Junior W. A. 2004. Propriedades físicas do solo sob prepare convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo native. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:155-163
- Bolinder, M.A.; Angers, D.A.; Giroux, M. & Laverdieare, M.R. 1999. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). *Plant and Soil* 215: 85-91.
- Bono A.; Alvarez R.; Buschiazzi D.E. & Cantet R.J.C. 2008. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J* 72: 1140-1149.
- Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* N°9: 177-213p.
- Botero, J. A. 2011. Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de Carbono. Disponible <<http://www.fao.org>.
- Bronick, C.J. & R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3-22.
- Campos, B.C; Reinert, D.J; Nicolodi, R & Cassol, L.C. 1999. Dinâmica da agregação inducida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23, pp. 383-391.

- Cantú, M P; Becker, A; Bedano, J. C &. Schiavo, H .F. 2007. Evaluación de la calidad del suelo mediante indicadores e índices. CI. SUELO (ARGENTINA) 25(2): 173-178.
- C.A.R.T.A. 1964. Compañía Argentina Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos. Consultores: Mancini, F; Sanesi, G & Lasserre, S. Informe Edafológico Misiones.
- Carter, M. R. 1990. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. Soil Tillage Res. 15: 257-268.
- Carter, M.R., 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. Agron. J. N°94. 38-47p.
- Calegari, A.; Mondardo, A.; Bulisani; E.A.; Wildner, L.P.; Costa, M.B.B.; Alcantara, P.B.; Miyasaka, S & Amado, T.J.C. 1993. Abudação verde no sul do Brasil. Rio de Janeiro, AS-PTA, 2.^a ed. 346 p.
- Casas, R.; Michelena, R & Lacorte, S.1983. Relevamiento de propiedades físicas y químicas de suelos sometidos a distintos usos y manejos en el sur de Misiones y NE de Corrientes. INTA-EEA. Misiones Nota Técnica N° 35.18p.
- Castiglioni, M. G.; Massobrio, M. J.; Chagas, C. I.; Santanatoglia, O. J. & Buján, A. 2006. Infiltración del agua con labranza cero del suelo en una microcuenca agrícola de Argentina Terra Latinoamericana, vol. 24, núm. 3, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. pp. 423-430.
- Costa, F.S., 2001. Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo do solo em experimentos de longa duração. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina. 98p. (Tese de Mestrado)
- Costa, F.S.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Fontoura, S.M.V. & Wobeto, C.2003. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 27:527-535.
- Cruz, A. C.; Pauleto, E. A.; Flores, C. A.; Silva, J. B. 2003. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, N° 27. 1105 – 1112p
- Cruzate G; Panigatti JL & Sosa A. (ed.). 2007. Suelos y ambientes de Misiones. INTA. Disponible en: <http://inta.gob.ar/imagenes/misiones.jpg/view>.
- Dalal, R.C & Mayer, R.J. 1986. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. Australian Journal of Soil Research 24(2) 281 – 292.
- Dalurzo, H.C; Vazquez, S & Ratto, S. 2002. Indicadores químicos y biológicos de calidad de suelos en Oxisoles de Misiones (Argentina). Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2002. Universidad Nacional del Nordeste.
- Dalurzo, H.C; Serial, R.C; Vazquez, S & Ratto, S. 2001. Indicadores físicos de calidad de suelos en Oxisoles de Misiones (Argentina). Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2002. Universidad Nacional del Nordeste.
- Dalurzo H.C; Toledo D. M. & Vazquez S. 2005. "Estimación de Parámetros Químicos y Biológicos en Oxisoles con Uso Citrícola". Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. N° 23. 159-165p.

- De Boodt M & De Leenheer L, 1961. Soil structure index and plant growth. Proceeding of the International Symposium on Soil structure, Ghent Bélgica, 234-244.
- Dedecek. R.A., Rodigheri. H.R., 1999. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 38, p. 77-88.
- Degens, B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and factors affecting these: review. Australian Journal of Soil Research, 35, 431-59.
- Derpsch, R. 1999. Expansión mundial de la siembra directa. Avances tecnológicos. En: V Reunión de la Red Latinoamericana de Agricultura Conservacionista, Florianópolis, Santa Catarina.
- Derpsch, R; Roth, C.H; Sidiras, N. & Köpke, U., 1991. Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn : GTZ. N° 245. 272 p.
- Deshpande, T. L; Greenland D. J & Quirk J. P. 1968. Changes in soil properties associated with the removal of iron and aluminium oxides. *J. Soil Sci* 19: 108-122.
- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Diaz-Zorita, M & Grosso GA. 2000. Soil water related properties and the compactability of soils from the Pampean region of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 121-126.
- Djegui,N; De Boissezon P & Gavinelli E. 1992. Statut organique d'un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous forêt et différents de cultures. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 27 (1): 5-22.
- Doran, J. W. & Jones A. J (Eds.). 1996. Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America. Special Publication 49. Madison, Wisconsin, USA. 410 p.
- Doran, JW & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set. Pp. 25-37. In: Methods for assessing Soil Quality, SSSA Special Publication N° 49, Wisconsin, USA.
- Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: JW Doran; DC Coleman; DF Bezdicek & BA Stewart (eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication N° 35. Wisconsin, USA.
- Drinkwater L. E, Wagoner P and Sarrantonio M. 1998. Legume-based cropping system have reduce carbon and nitrogen losses. *Nature* 396:262-265.
- Duxbury, J.M; M.S. Smith & J.W. Doran. 1989. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: D. Coleman, J. Oades y G. Uehara (Eds.). Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystem. Department of Agronomy and Soil Science. University of Hawaii, Honolulu. Hawaii. pp. 33-67.
- Echeverria, H.E & Garcia, F. 2014. Fertilidad de suelos y uso de fertilizante. 2da ed. Buenos Aires ediciones INTA. En cap. 28, p 739-752.
- Edwards, A.P. & Bremner, J.M., 1967. Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.* 18, 64-73.
- Ellis, S. & Mellor, A. 1995. Soils and Environment, London: Routledge. A modern text with many examples and illustrations of soil profiles, soil transects and soil distributions. Edited by Keith Richards University of Cambridge.

- Erracaborde, E.N. 1973. Abonos en Yerba Mate. INTA. Estación experimental agropecuaria Misiones. Informe Técnico N° 19.
- Etchevers B., J. D. 1999. Indicadores de calidad de suelos. *EN: Conservación y restauración de Suelos*. Siebe C., H. Rodarte, G. Toledo, J. D. Etchevers y K. Oleschko (eds.) Universidad Nacional Autónoma de México y Programa Universitario del Medio Ambiente, México, D.F. 239- 262p.
- Espinosa, Y. 2006. Secuestro de Carbono en el Suelo. Red Engormix. Disponible. <http://www.078-p0.htm>.
- Fabrizzi, KP; García FO; Costa JL & Picone LI. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81: 57-69.
- FAO. 2002. Captura de carbono en el suelo para un mejor manejo de la tierra. Cap 3. Manejo de las tierras forestales, de pastoreo y cultivadas para aumentar la captura de carbono en los suelos. N° 96. Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy.
- FAO.2005.The State of Food Insecurity in the World. Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy.
- Fernández, R. A.; Martiarena, R. A.; Lupi, A. M.; Von Wallis, A. y Phar, N. 2010. Manejo de residuos para el establecimiento de *Pinus tadea* L. y la condición química del suelo. Impacto a los 86 meses. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Ferreira, A. S; Dos Santos, M. A; & Correa, G. F. 2012. Soil microbial response to glucose and phosphorus addition under agricultural systems in the Brazilian Cerrado. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 85(1): 395-403.
- Franzluebbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*. N°66, 95-106p.
- Franzluebbers, A.J; Schoenberg, H.H & Endale, D.M., 2007. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil and Tillage Research* 96, 303–315.
- Freitas, V.H. 2000. Soil Management and Conservation for Small Farms in FAO N° 77. 66p.
- Forsythe, W & Tafur N. 1985. The effect of various methods of land preparation on soil resistance to penetration and yields of corn (*Zea mays* L), cassava (*Manihot esculenta* CRANTZ), and sweet potato (*Ipomea batata* L.) in association. 1. Effect of cropping systems and land preparation on the soil. *Turrialba* 35: 357-370.
- Galantini, J.A; Iglesias, J.O; Maneiro, C.; Santiago, L. & Kleine, C. 2006. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. INTA. Argentina. RIA, 35 (1): 15-30.
- Glinski, J & J Lipiec. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida, USA. 250 pp.
- Graecen, E. L. 1986. Root response to soil mechanical properties. *Trans. 13th Congress Inter. Soc. Soil Sci. Hamburg* N°5: 20-47p.
- Gregorich, EG & HH Janzen. 1996. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. Pp. 167-190. *En: MR Carter & BA Stewart (eds.) Structure and organic matter storage in agricultural soil*. Lewis Publishers. CRC Press. Boca Raton, Florida, EE.UU.

- Gruner, G. 1955. Erosión de suelo en Misiones. Ministerio de agricultura y ganadería de Misiones. Miscelanea N°10.
- Godagnone, R. E & De la Fuente, J. C. (editores). 2013. Inventario del recurso suelo del Departamento de L.N. Alem. Buenos Aires, INTA. 160p.
- Gonzalez, R.D; H.C. Dalurzo, & S. Vazquez. 2003. Indicadores de calidad de suelos del sur de la Provincia de Misiones. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2003. Universidad Nacional del Nordeste.
- Govaerts B.; Sayre K.D. & J. Deckers 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87: 163-174.
- Guerif, J. G; Richard, C; Durr, J. M; Machet, S; Recous & Roger- Strade J. 2001. A review over tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soi Tillage Res.* 61: 13-32.
- Habern, J. 1992. A soil health index. *Journal of soil and water Conservation* 47: 6-10.
- Hartemink, A. E. 1998. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Pua New Guinea. *Geoderma* N° 85. 283-306P.
- Hartemink, A. E. 2002. Soil science in tropical and temperate regions. *Adv. Agron.*N°77. 269-291.
- Havlin, J. L; Kissel, D. E; Maddux, L. D; Claassen, M. M & J. H. Long. 1990. Crop Rotation and Tillage Effects on Soil Organic Carbon and Nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:448-452.
- Heim, A; Wehrli, L; Eugster, W & Schmidt, M.W.I., 2009. Effects of sampling design on the probability to detect soil Carbon stock changes at the Swiss CarboEurope site Lägeren. *Geoderma* 149, 347–354.
- Heredia, O.S; Piccolo, G. A; Giuffré, L. & Pascale, C. 2005. Evolución de la fertilidad del suelo en yerbales consociados con abonos verdes. *Cerro Azul. Misiones. EEA Cerro Azul*, N°89. p13.
- Hernandez A; Morales M; Morell, F; Borges, Y; Moreno H & Vargas D. 2007. *Cultivos Tropicales*. Vol 28, N° 3, p 55-60.
- Hernández, R.M. 2000. Efectos de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de Ultisoles en el Estado de Guarico-Venezuela. *AgronomíaTropical*.N°50.19-29p.
- Hernanz, J.L; Lopez, R; Navarrete, L & Sanchez-Giron, V. 2002. Long-term effects of tillage systems and rotation on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil and Tillage Resarch.* 66. P 129-141.
- Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F & A Alvarado. 2012. Principales Suelos de Costa Rica. Sociedad Costarricense de la Ciencia del Suelo. http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html.
- INYM. 2012. Instituto Nacional de la Yerba Mate. Superficie cultivada por departamento. <http://www.inym.org.ar/inym/imagenes/Estadisticas/sup%20cultivada%20depa.pdf>.
- Horton, R., M; D.Ankeny & Allmaras R. R. 1994. Effects of soil compaction on soil hydraulic properties. pp. 141-155. In: Soane B. D. y C. van Ouwerkerk (eds.). *Soil compaction in crop production*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.

- Imhoff, S; Pires da Silva A; Dias Junior M de S & Tormena C. A. 2001. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 25:11-18.
- INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Castelar, Buenos Aires.
- IRAM-SAGyP 29578: 2011. Esquema 1. Calidad ambiental - Calidad del suelo Determinación de nitrógeno en suelo por el método Kjeldahl modificado.
- IRAM-SAGyP 29571-2. 2011. Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla sulfocrómica en suelos.
- Janzen, H. H. 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? *Soil biol. Biochem.* N°38. 419-424p.
- Karlen, D.L. & Stott, D.E. (1994) A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. (J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and B.A. Stewart, eds.). pp. 53-72. Soil Science Society of America Special Publication 35, Madison, WI.
- Lal, R. & Cummings, D.J., 1979. Clearing a tropical forest. I. Effects on soil and micro- climate. *Field Crops Res.*, 2: 91.-107.
- Lal, R. 1997. Soil tillage and crop production. Proceeding series num. 2. IIIA. Ibadan Nigeria.
- Lal, R., 1982: Management of clay soils for erosion control. *Tropical Agric.*, N°59 (2), 133 – 138p.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and Food security. *Science* 204: 1623-1627.
- Larson, W.E. & Pierce, F.J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation for sustainable land management in the developing world : proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai, Thailand.
- Larson, W. & Pierce, F. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Sci. Soc. Amer. Special. Publication.* 35. SSSA and ASA, Madison, WI. 37-51p.
- Ligier, H; Matteo, H; Polo, H & Rosso, J. 1990. Provincia de Misiones. En Atlas de Suelos de la República Argentina, INTA 1990. 667p.
- Lipiec, J. & R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116: 107-136.
- López, A; Schlönvoigt, A; Muhammad, I; Kleinn, C. & Kanninen, M. 2011. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. *Rev. Agroforestería en las Américas.* Vol. 6. No. 33.
- Louman, B; Quirós, D & Nilsson, M. 2001. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Turrialba CATIE. N°46. 265p.
- Loveland J. & Webb, P; 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research.* Volume 70 Pages 1–18.
- Lugo, A. E; Sanchez, M. J. & Brown, S., 1986. Land use and organic carbon content of some subtropical soils. *Plant and Soil* 96:185-196.

- Lupi A.; Fernández, R.; Cosentino, D. & Venialgo, C. 2002 Preparación del terreno para la segunda rotación forestal, ¿qué sucede con la estabilidad de los agregados del suelo? XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia.
- Márquez, J. J. 2006. Mecánica de suelos y estudios geotécnicos en obras de ingeniería. p 16-18.
- Marques da Silveira, P. 1999. Efeito do Sistema de preparo na Densidade do Solo. Embrapa. Pesquisa em foco. N° 23.
- Martin, G & Rivera, R. 2004. Mineralización del nitrógeno de la *Canavalia ensiformis*, en un suelo ferralítico rojo de la Habana. Cultivos tropicales, Vol 25, N° 3, p 83-88.
- Martinez Crovetto, R. 1963. Esquema fitogeográfico de la provincia de Misiones. Bonplandia. T1 (3):171-223.
- Margalot, J. A. 1994. Geografía de Misiones. Industrias Gráficas el Libro. Buenos Aires 261p.
- Medina-Méndez, J; Volke-Haller, V.H; González-Ríos, J; Galvis-Spínola, A; Santiago-Cruz, M.J & Cortés-Flores, J.I. 2006. Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en luvisoles del Estado de Campeche. Universidad y Ciencia. Trópico húmedo. Montecillo, estado de México. 22 (2):175-189.
- Moreno, I; Orioli, G; Bonadeo, E. & Marzari, R., 1999. Dinámica de C y N en suelos bajo diferentes usos. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile.
- Moreno Álvarez, J.M. 2002. Modificaciones estructurales de suelos ferralíticos rojos bajo diferentes manejos. Tesis de Maestría en Ciencias del Suelo. Universidad Agraria de la Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez". Facultad de Agronomía.
- Morgan, R.P.C. 2005. Soil Erosion and Conservation. 3ra edition. Blackwell Publishing, Oxford. 304 p.
- Mórtola, N; Heredia, O y Boca T. 2010. Formas de fósforo bajo distintos manejos de residuos forestales. La fracción orgánica lábil como indicador de calidad. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Prov. Santa Fé, Argentina (editado en CD).
- Morrás, H & Piccolo, G. A. 1996. Degradación física y recuperación de un Ultisol bajo cultivo de Yerba Mate en la provincia de Misiones. INTA. EEA Cerro Azul. Misiones. N°2.12p.
- Oades, J. M, 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56: 377-400.
- Orellana, de JA & MA Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo* 12: 75-80.
- Parker, J. C; Amos, D. F & Zelazny, L. W., 1982. Water adsorption and swelling of clay minerals in soil systems. *Soil Science Society of America Journal* 46: 450-456.
- Pereira, H.C; Dagg M & Hosegood P.H. 1964. A tillage study of Kenya coffee. Part IV. The physical effect of contracting tillage treatments over thirty consecutive cultivation season. *Empire journal of experimental Agriculture*. 32: 31-34.

- Pereira, H.C.M. & Jones P.A. 1954a. A tillage study of Kenya coffee. Part II. The effect of tillage on the structure of the soil. *Empire journal of experimental Agriculture*. N°22.
- Pereira, H.C.M. & Jones P.A. 1954b. A tillage study of Kenya coffee. Part I. The effect of tillage practices on coffee yields. *Empire journal of experimental Agriculture*. N°22. 231-241p.
- Píccolo, G.A. 1996. Transformaciones de la materia orgánica en un suelo Laterítico (Misiones, Argentina): I. Distribución del carbono orgánico en fracciones de agregados. XV° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. La Pampa, Argentina.
- Píccolo, G.A.; Rosell, R.A & Galantini, J.A. 1997. Estabilidad de los agregados de un suelo rojo laterítico virgen y cultivado (Misiones, Argentina) EEA Cerro Azul, Informe Técnico N°66. p 10.
- Píccolo, G.A. 2001a. Dinámica de la materia orgánica y nutriente en agroecosistemas de la provincia de Misiones (Argentina). Tesis de Doctorado. Universidad Nacional del Sur. Argentina. 249p.325-331.
- Píccolo, G. A. 2001b. Aptitud de las leguminosas tropicales para ser utilizadas como cubiertas verdes (Misiones, Argentina). Informe Técnico N° 72. INTA. EEA Cerro Azul. 8p.
- Pla Sentis I. 1994. Curso sobre efectos de la labranza en las propiedades físicas de los suelos. Instituto de Suelos. C.I.R.N. INTA Castelar. Capítulo II, Labranzas y Propiedades Físicas de los Suelos. pp 20.
- Pretty, J & Ball, A. 2001. Agricultural Influences on Carbon Emissions and Sequestration: A Review of Evidence and the Emerging Trading Options. Centre for Environment and Society Occasional Paper 2001-03 University of Essex.
- Primavesi, A.1980. Manejo ecológico do solo. Nobel. Sao Paulo.234 p.
- Primavesi, A. 2002 Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo: Nobel.
- Potter K; Jones O; Torbert H & Unger P. 1997. Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semiarid Southern Great Plains. *Soil Science* 162 (2): 140-147.
- Rasmussen, P.E. & W.J. Parton. 1994. Long-term effects of residue management in wheat- fallow: I. Inputs, yield and soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am.* J.58: 52-530.
- Reynolds, WD; BT Bowman; CF Drury; CS Tana & X Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131-146.
- Rojas,E. L. 1997. Dinámica del hierro y su rol como factor de agregación en un Ultisol de Misiones bajo diferentes manejos. Tesis de Magister. FAUBA. 137p.
- Ross, M.S; Coutas, C.L & Hsieh, Y.P. 2003. Soil Productivity relationship, and organic matter turnover in dry tropical forest of the Florida Keys. *Plant and soil*. N°. 253. 479-492p.
- Sá de Morales, J.C & Lal, R. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage cronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till. Res.* N°. 46-56p.
- SAGyP- INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina.

- Sacchi, G & De Pauli, C. 2002. Evaluación de los cambios en las propiedades físicas y químicas de un argiustol udico por procesos de degradación. *Agrociencia*. Vol. VI N° 2 pág. 37-46.
- Salamanca J. A & Sadeghian K. H, S. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé* 56(4):381-397.
- Sanchez, P. A. 1976. *Properties and manegement soils in the tropic*. New York. John Wiley & Sons.
- Sánchez, P.A. 1981. *Suelos del Trópico. Características y Manejo*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 660p.
- Sanchez, P. A. 2002. Soil Science as a major player in world development. Plenary session. Keynote Lecture. 17° World Congress on Soil Science, Bangkok, Thailand.
- Sánchez, J. E; Harwood, R. R.; Willson, T. C; Kisilkaya, K; Smeenk, ; Parker, E.; Paul, E.A; Knezek, B. D & Robertson, G. P., 2004. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agron. J.* N°96. 769-775p.
- Sarrantonio, M., J; Doran, M. Liebig, J.J & Halvorson . 1996. On-Farm Assesment of Soil Quality and Healt. 83. 105pp. In. *Methods for assessing Soil Quality*. John Doran and Alice Jones. (Ed).
- Shukla M.K; Lal R & M. Ebinger. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Research*. 87 (2) pp. 194-204.
- Schwendenmann, L. & Pendall, E. 2006. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in Panama: Evidence from soil carbon fractionate and stable isotopes. *Plant Soil*. N° 232. 217-288p.
- Sisti, C.P.J; Dos Santos H.P; Kohhann, R; Alves B.J.R, & S. Urquiaga. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res*. 76:39-58.
- Six J; Elliot E.T. & Paustian K. 1999. Aggergate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1350-1358.
- Six, J; Feller, C; Denef, K; Ogle, O; Moraes, J & Albrecht, A. 2002 Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage *Agronomie* 22 (2002) 755–775 .
- Sosa, D. A, 1992. Evaluación de la productividad del cultivo de yerba mate en relación al estado nutricional suelo/planta. In: *Curso de capacitación en cultivo de yerba mate*. Cerro Azul INTA, p. 61-64.
- Sosa D. A. 2014. En *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editores Echeverria H. E y Garcia F. O. 2a ed. Capítulo 28. Buenos Aires, ediciones INTA. 739-752p.
- Soler da Silva, M.A; Mafra, A, Albuquerque J. A; Dalla Rosa J; Bayer C & Mielinczuk J. 2006. Propiedades físicas y tenor de carbono orgánico de un Argisol Rojo sobre distintos sistemas de uso y manejo. *Revista Brasileira Ci. Solo*, 30:329-337.
- Stamp, L.D. 1938. Land utilization and soil erosion in Nigeria. *Geographical Review* N°28: 32-45p.
- Studdert, G & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* N°64: 1496-1503p.

- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Croppasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Taboada M., Lavado R., Camilión M. 1988. Cambios volumétricos en un Natracuol típico. *Ciencia del suelo* 6: 151-157.
- Taboada, M. & Álvarez, C. 2008. Fertilidad física de los suelos. 2ª ed. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, Cap 6 155p.
- Taboada, M.A; Micucci F.G; Cosentino, D.J, & Lavado R.S. 1988. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* 49:57-63.
- Tallarico, L. A & Caravello, R. V. A, 1964. Los índices de estructura de Henin y Yoder y su correlación con el contenido de materia orgánica y la porosidad de los agregados de un suelo pradera. *Rev. Inv. Agrop* 1: 55-63.
- Teruggi, M.E. 1955. Los basaltos tholeiíticos de Misiones UNLP. Tomo XVIII. *Geología* N° 70.
- Thomaz, E. L & Antoneli, V. 2008. Erosão e degradação do solo em área cultivada com Erva-mate (*Ilex paraguariensis*), Guarapuava – Pr. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 27, n. 1, p. 21-30.
- Thomas RS; RL Franson & GJ Bethlenfalvay .1993. Separation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and root effects on soil aggregation. *Soil Science Society of American Journal* 57: 77-81.
- Tiessen, H.; Menezes, R.S.C.; Salcedo, I. H & Wick, B. 2003. Organic matter transformation and soil fertility in a treed pasture in semiarid NE Brazil. *Plant & Soil.* N° 252. 195-205p.
- Tisdall J M.1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research* 29: 729-743.
- Tisdall, J. M. & Oades, J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Tisdall, J M. 1994. Possible rol of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant & Soil* 159: 115-121.
- Toledo D.M; Galantini J.A; Ferreccio E; Arzuaga S.; Gimenez L. & Vázquez, S., 2013. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del Suelo, Argentina* 31(2): p 201-212
- Toledo D.M; Galantini J.A; Dalurzo H.C; Vazquez S & Bollero G. 2013. Methods for Assessing the Effects of Land Use Changes on Carbon Stocks of Subtropical Oxisols. *Soil Science Society of America Journal.* vol. 77 No. 5, p. 1542-1552.
- Toledo, D.M., S.M. Contreras Leiva, S. Arzuaga, C. Fernández López, H.C. Dalurzo, and S. Vazquez. 2010. Efecto del cultivo continuo y de la labranza convencional sobre indicadores de calidad de suelo en Oberá (Misiones).
- Tormena, C.A.; Silva, A.P. & Libardi, P.L. 1998.Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P. & Libardi, P.L. 1999.Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52:223-232.

- Tormena, C. A.; Friedrich, R.; Pintro, J. C.; Costa, A. C. & Fidalski, J. 2004. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, N° 28, 1023 – 1031.
- USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. USDA-ARS. SCS.
- VandenBygaart, A. J & Angers, D. A. 2006. Vers une quantification précise des variations de stocks de carbone organique du sol dans les écosystèmes agricoles. *Can. J. Soil Sci.* 86: 465–471.
- Veldkamp E.1994. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation *Journal: Soil Science Society of America Journal - SSSAJ*, vol.58,N° 1.
- Venialgo, C. A; Ingaramo, O; Ibaló, S; Roldán, M. F; Banzhaf, G & Gutierrez, N. C. 2004. Índice de cono, humedad presente y densidad aparente en diferentes labranzas y rotaciones. *Comunicaciones científicas y tecnológicas. UNNE. Resumen: A-076*
- Venialgo, C; Gutierrez, N; Sosa, D. A & Ingaramo, O. 2003. Influencia de diferentes manejos en suelos de Yerbales sobre la estabilidad de agregados. XIV Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. FCA. UNNE. Corrientes. Argentina.
- Von Wallis, A. 2013. Tesis de Maestría. Contenidos de materia orgánica y condición física de un Kandiuult de Misiones bajo diferentes sistemas de preparación del terreno forestal y bosque nativo. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencia del Suelo
- Von Wallis, A & Taboada M.A. 2014. Cambios en las condiciones físicas de un Kandiuult causados por la forestación 24° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca; Año
- Wander, M. M; Walter, G. L; Nissen, T. M; Bollero, G. A; Andrus, S.S & Avanaughgrant, D. A. 2002. Soil quality: Science and process. *Agron. J.* N°94, 23 – 32p.
- Wahl, NA; O Bens; B Schafer & RF Hüttl. 2003. Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: hydraulic conductivity, water repellency and water retention. *Physics and Chemistry of the Earth Parts ABC* 28 (33-36) p. 1377-1387
- Watts, C.W. & Dexter, A.R. 1997. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil & Tillage Research.* N°42, 253-275p.
- Walkley, A. & I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* N°63. 251-263p.
- West, T.O. & Post, W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1930–1946.
- White P.M. & Rice C.W. 2009. Tillage effects on microbial and carbon dynamics during plant residue decomposition. *Soil Sci. Soc. Am. J* 73: 138-145.
- Wilson M.; Paparotti O; Paz Gonzalez A. & E. Díaz Ucha. 2006. Ecuaciones de ajuste entre la Resistencia Mecánica a la Penetración y el contenido hídrico en un

lote en siembra directa. Actas del XX CACS. Salta y Jujuy, p 108. Trabajo CD. 5 pp.

- Wilson M. G; Tasi H A; Paz González A; Indelángelo, N & Díaz E. 2008. Indicadores de calidad de suelo del área de bosques nativos de Entre ríos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. San Luis.
- Woomer, P. L & Palm C. A. 1998. An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *The Commonwealth Forestry Review*. Vol. 77, No. 3, Special issue: forestry and carbon sequestration, pp. 181-190.
- Yimer F; I Messing; S Ledin & A Abdelka. 2008. Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia. *Soil Use and Management*, 24: 344–349

Anexos

Anexo I. Valores de los indicadores en las muestras del grupo 1.

Lote	Sub muestra	Prof. mts	CDMP mm	% H° g/g	Dap Mg m ⁻³	COS g Kg ⁻¹	% PT	TI mm min ⁻¹	% Cobertura	RM Mpa
32	1	0,1	1,56	26,97	0,81	17,20	69,44	14,05	57,00	0,55
32	1	0,2	1,79	36,02	0,82	14,70	68,93			1,18
32	1	0,4		41,02	0,85	11,20	67,87			2,47
32	1	0,6		42,06	0,86	8,30	67,57			
32	1	1		38,59	1,00	6,40	62,42			
32	2	0,1	1,66	31,02	0,73	17,60	72,30	13,05	45,00	0,60
32	2	0,2	2,11	37,47	0,87	13,50	67,18			0,80
32	2	0,4		33,55	0,87	12,20	67,01			1,31
32	2	0,6		37,34	0,88	8,80	66,66			
32	2	1		38,16	0,89	7,00	66,34			
32	3	0,1	1,86	30,60	0,75	17,40	71,65	11,35	50,00	0,59
32	3	0,2	2,23	43,87	0,77	15,10	70,90			0,92
32	3	0,4		38,39	0,80	12,10	69,94			1,43
32	3	0,6		40,45	0,85	9,50	67,80			
32	3	1		39,89	0,82	7,50	69,04			
33	1	0,1	1,92	29,09	0,90	13,90	66,02	11,74	15,00	1,35
33	1	0,2	2,01	21,12	0,94	13,60	64,65			2,53
33	1	0,4		48,64	0,79	8,30	70,10			1,82
33	1	0,6		38,30	0,96	8,60	63,61			
33	1	1		41,79	1,08	7,10	59,32			
33	2	0,1	1,44	40,12	0,95	12,90	64,27	11,38	18,00	1,27
33	2	0,2	1,99	44,41	0,81	12,80	69,55			1,74
33	2	0,4		60,92	0,83	7,80	68,83			1,35
33	2	0,6		48,03	0,80	7,40	69,85			
33	2	1		41,76	1,08	7,90	59,28			
33	3	0,1	1,53	31,50	0,80	14,90	69,93	11,02	20,00	1,84
33	3	0,2	1,89	29,33	0,79	13,70	70,18			2,25
33	3	0,4		34,67	1,05	7,80	60,27			1,83
33	3	0,6		36,17	1,10	7,70	58,53			
33	3	1		36,33	1,04	7,90	60,69			
34	1	0,1	1,87	19,56	0,91	13,80	65,79	7,18	16,00	0,42
34	1	0,2	2,24	27,39	0,81	13,20	69,33			0,58
34	1	0,4		34,14	0,94	5,80	64,59			0,84
34	1	0,6		32,46	0,92	7,90	65,40			
34	1	1		34,93	1,06	5,90	60,07			

34	2	0,1	1,66	25,09	0,89	13,40	66,60	7,19	13,00	0,33
34	2	0,2	1,98	30,40	0,81	13,40	69,50			0,83
34	2	0,4		32,15	1,09	8,60	59,00			0,80
34	2	0,6		33,16	0,91	6,30	65,79			
34	2	1		34,19	1,12	3,10	57,77			
34	3	0,1	1,54	24,78	0,90	11,40	66,10	8,13	19,00	0,44
34	3	0,2	2,27	28,41	0,81	10,50	69,52			0,96
34	3	0,4		32,85	0,96	7,20	63,74			0,62
34	3	0,6		34,49	1,00	6,30	62,44			
34	3	1		34,05	1,05	4,50	60,29			
35	1	0,1	1,12	30,42	0,75	18,00	71,52	12,29	79,00	0,42
35	1	0,2	1,48	38,18	0,92	16,30	65,25			0,69
35	1	0,4		35,23	0,82	11,80	69,03			0,84
35	1	0,6		38,51	0,93	6,00	64,79			
35	1	1		38,70	0,91	5,50	65,76			
35	2	0,1	1,15	24,88	0,85	17,40	68,03	7,93	75,00	0,98
35	2	0,2	1,37	33,00	0,91	13,30	65,66			0,92
35	2	0,4		37,07	0,87	7,90	66,99			0,79
35	2	0,6		40,26	0,92	8,30	65,26			
35	2	1		40,57	0,93	7,00	64,83			
35	3	0,1	1,02	36,60	0,98	16,70	63,21	10,83	83,00	0,74
35	3	0,2	1,45	32,16	1,13	16,70	57,43			1,25
35	3	0,4		35,30	1,02	10,70	61,55			1,26
35	3	0,6		38,40	1,04	6,60	60,91			
35	3	1		37,96	1,04	7,00	60,83			
36	1	0,1	1,30	25,27	0,92	21,60	65,10	17,22	85,00	0,65
36	1	0,2	1,69	30,74	1,01	12,80	61,93			1,20
36	1	0,4		32,85	1,00	8,30	62,38			1,15
36	1	0,6		35,02	1,05	7,90	60,42			
36	1	1		35,52	1,10	6,40	58,68			
36	2	0,1	1,23	25,64	0,97	14,60	63,47	18,92	88,00	0,69
36	2	0,2	1,54	32,94	1,02	12,80	61,62			1,41
36	2	0,4		32,59	0,87	10,20	67,13			1,50
36	2	0,6		30,71	1,06	11,20	59,92			
36	2	1		30,55	0,99	10,40	62,75			
36	3	0,1	1,14	23,32	1,01	13,70	61,70	17,82	92,00	0,79
36	3	0,2	1,58	28,64	0,98	11,80	62,94			0,90
36	3	0,4		33,82	1,01	7,10	61,81			1,31
36	3	0,6		30,60	1,16	10,20	56,38			
36	3	1		35,52	1,03	6,00	61,06			
37	1	0,1	1,16	28,79	0,93	20,40	64,87	47,38	91,00	0,65

37	1	0,2	1,60	32,41	0,95	11,50	64,04			1,32
37	1	0,4		35,03	1,01	9,10	61,92			1,11
37	1	0,6		36,86	0,98	7,00	62,87			
37	1	1		35,94	1,10	6,20	58,68			
37	2	0,1	1,34	30,18	0,97	22,60	63,47	21,80	87,00	0,69
37	2	0,2	1,71	30,85	1,06	13,90	59,95			1,45
37	2	0,4		31,84	0,99	9,80	62,65			1,35
37	2	0,6		35,52	1,06	5,20	60,18			
37	2	1		36,78	1,04	7,20	60,84			
37	3	0,1	1,25	28,70	0,93	25,00	64,96	21,08	90,00	0,79
37	3	0,2	1,53	33,20	0,97	11,30	63,42			1,00
37	3	0,4		36,44	1,01	7,30	61,81			1,31
37	3	0,6		35,14	1,16	4,90	56,38			
37	3	1		36,79	0,98	5,20	63,03			
38	1	0,1	1,45	29,12	0,84	14,90	68,39	5,64	74,00	1,69
38	1	0,2	1,61	30,09	1,09	10,50	58,98			2,45
38	1	0,4		33,20	1,01	9,20	61,73			1,07
38	1	0,6		36,33	0,98	5,00	63,11			
38	1	1		37,96	1,11	4,20	57,96			
38	2	0,1	1,35	26,52	1,02	13,60	61,56	5,55	85,00	1,07
38	2	0,2	1,58	32,45	0,90	11,50	66,08			2,28
38	2	0,4		33,38	0,99	7,90	62,56			1,15
38	2	0,6		36,33	0,98	5,10	62,86			
38	2	1		37,26	0,97	4,60	63,53			
38	3	0,1	1,45	33,33	0,87	17,70	67,27	5,64	80,00	0,79
38	3	0,2	1,78	30,98	1,00	11,50	62,28			2,43
38	3	0,4		33,69	1,05	8,50	60,39			0,78
38	3	0,6		36,94	0,93	6,50	65,06			
38	3	1		38,64	0,98	4,20	63,17			
39	1	0,1	1,40	29,87	1,01	14,30	61,92	18,05	82,00	1,09
39	1	0,2	1,80	34,67	0,93	10,70	64,73			1,38
39	1	0,4		34,40	0,99	7,80	62,71			1,29
39	1	0,6		34,62	1,04	6,10	60,74			
39	1	1		34,49	1,02	4,60	61,63			
39	2	0,1	1,24	23,28	0,93	16,70	65,09	24,87	73,00	0,94
39	2	0,2	1,67	32,11	0,92	9,10	65,21			1,67
39	2	0,4		33,24	1,17	6,40	55,85			1,27
39	2	0,6		32,98	1,06	3,70	59,89			
39	2	1		33,77	1,08	2,80	59,13			
39	3	0,1	1,39	27,83	0,98	15,00	63,08	18,85	75,00	1,14
39	3	0,2	1,65	33,11	0,98	10,30	63,18			1,37

39	3	0,4		31,41	1,22	6,20	53,92			1,01
39	3	0,6		33,11	1,10	4,90	58,40			
39	3	1		34,85	1,05	3,60	60,48			
40	1	0,1	1,31	24,07	0,92	13,10	65,19	19,43	89,00	0,47
40	1	0,2	1,70	31,23	0,82	8,90	69,15			0,96
40	1	0,4		30,38	0,88	6,10	66,98			1,27
40	1	0,6		32,19	0,93	6,60	64,86			
40	1	1		33,24	1,09	5,00	58,99			
40	2	0,1	1,24	28,21	0,83	12,90	68,77	16,15	86,00	0,29
40	2	0,2	1,56	31,41	0,74	11,20	72,16			0,56
40	2	0,4		28,87	0,94	9,50	64,63			0,88
40	2	0,6		30,21	1,08	7,50	59,36			
40	2	1		29,87	1,11	4,00	58,03			
40	3	0,1	1,19	25,00	0,93	12,60	65,06	18,39	83,00	0,41
40	3	0,2	1,67	28,53	0,82	9,60	69,15			0,56
40	3	0,4		30,38	1,12	6,90	57,91			1,25
40	3	0,6		31,23	1,07	7,50	59,73			
40	3	1		32,10	1,10	7,70	58,48			
41	1	0,1	0,74	34,16	0,53	30,80	79,86	362,31	100,00	0,24
41	1	0,2	1,36	34,94	0,69	25,80	73,83			0,54
41	1	0,4		34,64	0,74	18,60	72,10			1,54
41	1	0,6		38,60	0,89	13,70	66,26			
41	1	1		35,08	0,86	8,70	67,60			
41	2	0,1	0,65	38,26	0,45	35,80	82,84	320,10	100,00	0,34
41	2	0,2	1,09	33,51	0,60	22,30	77,20			0,65
41	2	0,4		34,95	0,64	21,70	75,74			1,75
41	2	0,6		34,25	0,69	15,40	74,15			
41	2	1		34,90	0,84	9,90	68,23			
41	3	0,1	0,75	35,30	0,53	30,20	80,01	235,40	100,00	0,29
41	3	0,2	1,25	33,42	0,62	20,40	76,56			0,78
41	3	0,4		34,15	0,65	25,90	75,29			1,82
41	3	0,6		31,02	0,73	15,90	72,42			
41	3	1		34,28	0,69	13,90	73,98			
42	1	0,1	0,83	32,66	0,76	30,10	71,34	172,06	100,00	0,96
42	1	0,2	1,21	13,94	0,83	15,90	68,55			1,72
42	1	0,4		32,93	0,77	13,20	71,00			1,62
42	1	0,6		37,61	0,75	11,90	71,70			
42	1	1		34,40	0,97	8,60	63,51			
42	2	0,1	0,79	56,53	0,52	30,40	80,32	173,01	100,00	1,39
42	2	0,2	1,45	39,76	0,70	15,50	73,73			1,59
42	2	0,4		37,85	0,61	13,00	77,13			1,26

42	2	0,6		37,82	0,78	12,30	70,64			
42	2	1		31,04	0,89	9,20	66,30			
42	3	0,1	0,69	31,80	0,72	29,80	72,78	264,55	100,00	1,50
42	3	0,2	1,12	27,29	0,79	15,40	70,09			1,73
42	3	0,4		34,59	0,74	11,70	71,89			1,36
42	3	0,6		29,38	0,95	9,20	64,19			
42	3	1		32,87	1,06	9,70	60,15			
43	1	0,1	0,91	25,88	0,68	21,10	74,33	193,65	100,00	0,11
43	1	0,2	1,32	26,78	0,78	16,20	70,54			0,16
43	1	0,4		27,83	0,88	12,80	66,98			0,43
43	1	0,6		28,32	0,83	9,10	68,75			
43	1	1		30,47	1,03	6,10	61,16			
43	2	0,1	0,87	30,86	0,65	19,00	75,52	237,42	100,00	0,15
43	2	0,2	1,56	31,56	0,75	14,70	71,75			0,57
43	2	0,4		32,06	0,74	9,90	72,10			0,81
43	2	0,6		30,83	0,98	10,30	62,93			
43	2	1		29,42	0,98	9,60	62,87			
43	3	0,1	0,78	34,36	0,51	20,50	80,62	223,21	100,00	0,14
43	3	0,2	1,47	32,45	0,69	16,00	73,90			0,50
43	3	0,4		31,06	0,78	11,50	70,57			0,87
43	3	0,6		30,60	0,90	6,40	66,04			
43	3	1		30,19	1,03	6,80	61,23			
44	1	0,1	0,71	27,02	0,63	28,60	76,07	283,13	100,00	0,86
44	1	0,2	1,07	27,78	0,66	16,90	75,28			0,69
44	1	0,4		29,75	0,86	15,40	67,48			1,05
44	1	0,6		36,28	0,83	6,90	68,68			
44	1	1		37,01	0,90	6,30	66,16			
44	2	0,1	0,75	28,68	0,62	31,80	76,73	205,25	100,00	0,73
44	2	0,2	1,12	27,24	0,78	18,70	70,42			0,72
44	2	0,4		28,94	0,94	16,00	64,57			1,15
44	2	0,6		33,29	1,00	9,30	62,45			
44	2	1		36,22	0,84	7,80	68,25			
44	3	0,1	0,68	29,34	0,70	22,50	73,66	280,58	100,00	0,96
44	3	0,2	0,98	31,89	0,86	12,80	67,51			0,56
44	3	0,4		33,29	0,90	13,60	66,23			0,60
44	3	0,6		35,87	0,98	6,80	63,06			
44	3	1		36,92	0,98	7,60	63,06			
45	1	0,1	1,16	29,38	0,83	21,50	68,77	136,38	100,00	0,70
45	1	0,2	1,51	28,39	0,94	15,70	64,65			0,99
45	1	0,4		29,12	1,01	11,60	61,91			0,94
45	1	0,6		30,89	1,04	9,40	60,79			

45	1	1		32,54	0,93	7,20	64,83			
45	2	0,1	0,88	26,96	0,88	25,00	66,98	168,57	100,00	0,58
45	2	0,2	1,23	26,86	0,85	16,30	67,77			0,96
45	2	0,4		27,45	0,77	14,00	70,91			0,55
45	2	0,6		30,56	0,91	10,60	65,55			
45	2	1		33,60	0,89	10,40	66,57			
45	3	0,1	0,87	25,69	0,84	27,50	68,43	237,19	100,00	0,65
45	3	0,2	1,40	24,94	0,90	15,00	65,87			0,67
45	3	0,4		25,60	0,85	14,50	68,04			0,99
45	3	0,6		28,85	0,77	7,80	70,79			
45	3	1		29,66	0,95	7,50	64,34			
46	1	0,1	0,73	30,82	0,84	25,10	68,35	143,84	100,00	0,33
46	1	0,2	1,38	31,67	0,93	11,80	64,94			0,81
46	1	0,4		30,05	1,08	11,40	59,32			0,90
46	1	0,6		34,99	1,09	5,30	58,80			
46	1	1		35,76	0,98	11,50	63,02			
46	2	0,1	0,99	35,14	0,68	33,70	74,44	142,60	100,00	0,31
46	2	0,2	1,56	43,79	0,80	14,60	69,81			1,27
46	2	0,4		29,23	0,97	12,10	63,27			0,90
46	2	0,6		33,38	1,03	6,70	61,16			
46	2	1		36,94	0,98	4,90	63,20			
46	3	0,1	0,83	31,63	0,71	27,20	73,16	148,07	100,00	0,29
46	3	0,2	1,37	34,81	0,88	15,20	66,78			1,21
46	3	0,4		35,76	0,82	11,10	69,04			1,04
46	3	0,6		35,13	0,74	8,60	72,21			
46	3	1		39,01	0,88	6,40	66,64			
47	1	0,1	1,08	28,33	1,06	13,80	60,15	212,73	100,00	0,74
47	1	0,2	1,51	29,70	0,95	9,10	64,34			0,90
47	1	0,4		30,73	0,82	10,60	69,03			1,27
47	1	0,6		34,23	1,10	7,80	58,58			
47	1	1		33,51	1,09	4,10	58,83			
47	2	0,1	0,89	28,04	0,87	22,60	67,17	209,00	100,00	0,84
47	2	0,2	1,24	27,55	0,85	10,10	68,08			0,97
47	2	0,4		30,13	0,90	7,80	66,11			1,23
47	2	0,6		33,78	0,92	5,10	65,17			
47	2	1		33,20	1,11	5,50	58,06			
47	3	0,1	0,68	22,85	0,89	19,80	66,42	209,15	100,00	0,90
47	3	0,2	1,18	21,63	0,71	13,10	73,23			1,29
47	3	0,4		29,50	0,97	7,30	63,25			1,17
47	3	0,6		29,12	1,13	4,90	57,48			
47	3	1		32,02	1,11	5,50	58,09			

Anexo II. Valores de los indicadores en las muestras del grupo 2.

Lote	Sub muestra	Prof. mts	CDMP mm	% H° g/g	Dap Mg m ⁻³	COS g Kg ⁻¹	% PT	TI mm min ⁻¹	% Cobertura	RM Mpa
1	1	0,1	0,97	20,98	1,16	14,80	56,16	11,81	63,00	1,08
1	1	0,2	1,33	21,28	1,21	11,90	54,30			2,03
1	2	0,1	0,75	18,97	1,06	19,40	60,06	4,64	64,00	1,43
1	2	0,2	1,33	23,04	1,09	14,30	58,83			2,42
1	3	0,1	1,14	18,58	1,25	18,20	52,77	12,5	59,00	1,47
1	3	0,2	1,36	24,64	1,12	14,60	57,59			3,36
2	1	0,1	1,75	18,17	1,22	17,60	54,15	5	43,00	1,20
2	1	0,2	2,50	23,21	1,21	13,50	54,22			3,13
2	2	0,1	1,95	16,14	1,13	14,70	57,36	5	58,00	2,60
2	2	0,2	1,90	21,93	1,35	12,50	49,02			3,72
2	3	0,1	1,92	17,31	1,20	21,80	54,89	5	46,00	2,09
2	3	0,2	2,26	16,30	1,23	14,40	53,41			3,22
3	1	0,1	2,07	32,51	1,21	15,90	54,20	17,44	96,00	1,03
3	1	0,2	2,44	21,66	0,98	11,20	62,84			2,49
3	2	0,1	1,38	18,45	0,83	11,80	68,78	23,07	98,00	0,30
3	2	0,2	2,59	20,91	0,90	13,30	65,86			1,48
3	3	0,1	2,49	20,95	0,93	12,90	64,97	20,27	95,00	0,94
3	3	0,2	2,18	24,07	0,93	11,10	64,81			1,18
4	1	0,1	0,47	21,87	0,83	18,20	68,57	27,27	100,00	1,35
4	1	0,2	0,84	22,56	1,18	13,20	55,66			2,59
4	2	0,1	0,40	25,40	0,90	19,80	65,91	37,5	100,00	1,71
4	2	0,2	0,79	24,21	1,17	16,30	56,03			2,29
4	3	0,1	1,10	23,81	1,02	13,80	61,38	30	100,00	0,63
4	3	0,2	1,34	8,19	1,18	17,80	55,43			2,87
5	1	0,1	2,56	26,69	1,01	10,50	61,97	5	54,00	1,05
5	1	0,2	1,87	25,06	0,92	11,30	65,23			1,45
5	2	0,1	1,39	28,06	0,96	11,20	75,19	5	49,00	0,49
5	2	0,2	1,91	23,33	0,98	11,00	63,11			0,81
5	3	0,1	1,66	27,74	0,96	10,10	63,86	5	35,00	0,60
5	3	0,2	2,45	27,49	0,92	8,50	65,27			1,09
6	1	0,1	1,97	29,87	0,98	14,70	62,90	5	55,00	0,30
6	1	0,2	1,94	30,04	0,91	11,40	65,58			0,88
6	2	0,1	1,32	27,89	0,92	13,40	65,14	5	70,00	0,32
6	2	0,2	1,54	27,06	0,88	10,30	66,61			0,95
6	3	0,1	1,44	29,78	0,94	20,30	64,36	6,30	60,00	0,77
6	3	0,2	1,49	34,46	0,91	11,60	73,23			1,13
7	1	0,1	0,90	37,01	0,78	19,10	70,41	65,21	100,00	0,36
7	1	0,2	1,73	32,76	0,59	11,50	77,63			0,75

7	2	0,1	0,59	34,56	0,88	25,70	66,71	125	100,00	0,28
7	2	0,2	1,07	33,45	0,77	10,80	71,07			0,55
7	3	0,1	0,81	34,15	0,79	20,60	70,18	250	100,00	0,27
7	3	0,2	1,40	34,47	0,88	12,30	66,70			0,71
8	1	0,1	0,43	26,02	0,94	22,00	64,47	20,55	100,00	0,76
8	1	0,2	0,33	30,85	0,98	20,30	62,86			0,72
8	2	0,1	0,28	32,68	1,01	23,00	61,72	62,5	100,00	0,88
8	2	0,2	0,75	33,20	1,00	16,10	62,08			1,07
8	3	0,1	0,48	38,74	0,83	27,30	68,52	25,42	100,00	0,41
8	3	0,2	0,68	23,28	0,94	18,40	64,54			0,96
9	1	0,1	0,79	25,72	1,02	16,90	61,37	7,89	73,00	0,48
9	1	0,2	1,49	28,05	0,90	11,80	66,23			1,54
9	2	0,1	1,57	26,45	1,04	12,30	60,72	9,80	79,00	1,16
9	2	0,2	1,80	24,43	0,93	11,40	64,76			1,53
9	3	0,1	0,91	26,08	1,18	12,30	55,33	16,67	82,00	1,11
9	3	0,2	0,94	44,23	0,88	11,30	77,98		82,00	1,22
10	1	0,1	0,62	37,69	0,73	30,20	72,40	115,38	100,00	0,15
10	1	0,2	0,81	35,88	0,75	18,60	71,64			0,40
10	2	0,1	0,65	35,29	0,90	28,80	65,88	187,5	100,00	0,39
10	2	0,2	0,71	37,22	0,64	18,80	75,79			0,64
10	3	0,1	0,70	36,32	0,75	18,30	71,70	375	100,00	0,23
10	3	0,2	0,90	25,05	1,00	15,10	62,20			0,33
11	1	0,1	2,04	28,67	1,03	8,90	61,13	5,26	51,00	0,91
11	1	0,2	2,76	22,65	0,98	7,20	63,18			1,32
11	2	0,1	3,69	28,08	1,00	11,00	62,45	9,49	45,00	0,36
11	2	0,2	2,05	24,41	1,07	11,50	59,57			1,30
11	3	0,1	1,72	26,72	1,26	14,70	52,59	10,41	53,00	0,30
11	3	0,2	1,81	21,02	0,86	14,20	67,42			1,05
12	1	0,1	0,93	26,62	0,95	14,30	64,10	19,73	95,00	0,49
12	1	0,2	0,71	28,95	0,92	10,40	65,42			1,10
12	2	0,1	1,19	29,63	0,84	15,50	68,14	14,01	90,00	0,39
12	2	0,2	1,15	31,19	0,79	11,90	70,24			0,60
12	3	0,1	1,33	32,39	1,04	14,20	60,80	12,60	93,00	0,27
12	3	0,2	1,28	20,89	1,07	12,00	59,74			0,73
13	1	0,1	1,56	25,50	1,13	14,50	57,26	5	58,00	1,54
13	1	0,2	1,23	22,71	1,07	10,80	59,50			1,84
13	2	0,1	1,47	26,35	1,16	14,70	56,32	5	65,00	1,64
13	2	0,2	1,42	21,76	1,02	12,10	61,35			1,98
13	3	0,1	1,13	26,64	1,24	17,60	53,38	5	71,00	1,49
13	3	0,2	0,86	20,57	1,03	11,70	61,27			2,07
14	1	0,1	0,97	23,53	1,16	21,30	56,17	18,99	100,00	0,58

14	1	0,2	0,91	11,99	1,03	14,40	60,99			1,01
14	2	0,1	1,33	24,93	1,22	17,80	54,02	8,02	100,00	0,39
14	2	0,2	0,80	22,92	1,04	13,70	60,74			1,80
14	3	0,1	1,01	23,47	1,08	17,70	59,23	21,74	100,00	0,58
14	3	0,2	1,42	31,03	0,79	12,10	70,05			1,23
15	1	0,1	1,80	28,19	0,91	19,60	65,54	10,34	47,00	0,62
15	1	0,2	1,70	32,66	0,83	17,10	68,78			0,82
15	2	0,1	1,27	27,31	0,92	23,70	65,22	11,19	57,00	0,70
15	2	0,2	1,58	29,84	1,09	13,90	58,68			0,86
15	3	0,1	1,38	29,75	0,88	32,70	66,88	5,43	53,00	0,65
15	3	0,2	1,62	29,48	1,03	16,60	60,96			1,19
16	1	0,1	2,72	26,35	1,04	11,90	60,60	8,15	57,00	0,27
16	1	0,2	3,33	29,56	1,20	10,60	54,72			0,55
16	2	0,1	2,13	25,11	0,99	11,60	62,72	5	55,00	0,43
16	2	0,2	2,64	31,57	1,17	10,30	56,01			0,99
16	3	0,1	2,87	27,65	1,03	12,40	61,09	5	50,00	0,53
16	3	0,2	2,92	26,21	1,09	12,20	58,83			0,88
17	1	0,1	1,39	29,00	1,00	18,70	62,24	12	67,00	0,71
17	1	0,2	1,50	34,14	1,01	14,10	62,06			1,73
17	2	0,1	0,92	35,36	0,98	17,60	62,92	18,98	55,00	0,63
17	2	0,2	1,21	33,68	1,08	15,10	59,12			0,92
17	3	0,1	0,69	28,85	0,89	19,70	66,40	12,5	72,00	0,35
17	3	0,2	0,74	29,56	0,91	19,80	65,73			0,94
18	1	0,1	1,23	35,33	0,90	29,40	66,06	11,36	83,00	0,23
18	1	0,2	1,23	42,33	0,84	14,50	68,13			0,36
18	2	0,1	1,16	39,00	0,88	28,10	66,97	20,83	71,00	0,50
18	2	0,2	1,93	35,74	0,88	16,90	66,91			0,84
18	3	0,1	1,46	37,45	0,81	24,80	69,47	25	75,00	0,36
18	3	0,2	1,87	40,22	0,83	15,20	68,82			0,92
19	1	0,1	2,17	30,44	0,96	12,60	63,66	6,12	4,00	0,56
19	1	0,2	2,52	32,56	1,11	12,20	58,18			0,88
19	2	0,1	2,19	30,55	0,94	13,20	64,59	10,71	6,00	0,23
19	2	0,2	2,62	36,52	0,95	13,70	64,19			0,61
19	3	0,1	1,42	32,53	0,99	12,30	62,72	5	6,00	0,37
19	3	0,2	2,08	33,85	1,06	13,90	60,16			0,83
20	1	0,1	0,97	29,66	0,79	15,40	70,12	30,61	68,00	0,32
20	1	0,2	1,46	40,35	0,83	15,50	68,51			0,56
20	2	0,1	0,94	38,57	0,81	22,60	69,45	34,09	76,00	0,39
20	2	0,2	2,48	42,51	0,88	17,80	66,96			0,61
20	3	0,1	0,12	35,56	0,85	21,10	68,02	41,66	69,00	0,43
20	3	0,2	1,54	41,21	0,89	16,50	66,40			0,75

21	1	0,1	2,09	37,37	0,88	18,20	66,89	10,34	100,00	0,30
21	1	0,2	1,29	43,74	0,95	17,10	64,27			0,46
21	2	0,1	1,87	37,26	0,71	18,10	73,05	13,76	100,00	0,32
21	2	0,2	1,24	43,11	0,85	18,90	67,84			0,51
21	3	0,1	1,15	39,17	0,79	22,90	70,19	11,11	100,00	0,29
21	3	0,2	0,99	44,77	0,88	19,40	66,94			0,36
22	1	0,1	1,29	15,52	1,07	23,90	59,79	26,78	83,00	0,45
22	1	0,2	1,39	22,03	1,03	19,10	61,04			2,01
22	2	0,1	1,14	23,11	0,89	15,50	66,34	25	80,00	0,36
22	2	0,2	1,43	23,46	0,96	15,30	63,72			2,30
22	3	0,1	1,49	26,78	0,87	13,10	67,19	16,60	86,00	0,61
22	3	0,2	1,54	30,29	1,00	12,40	62,18			1,01
23	1	0,1	1,67	19,22	0,96	13,80	63,67	6,5	22,00	0,77
23	1	0,2	1,95	22,19	1,06	11,40	60,18			4,33
23	2	0,1	2,01	15,67	0,83	13,40	68,58	5	20,00	0,45
23	2	0,2	1,91	21,49	1,05	11,30	60,50			5,16
23	3	0,1	0,98	20,17	0,94	16,10	64,60	5	29,00	2,31
23	3	0,2	1,17	23,79	1,02	12,40	61,57			4,55
24	1	0,1	0,57	27,43	1,06	39,50	60,01	166,67	100,00	0,69
24	1	0,2	1,08	24,25	1,02	20,00	61,44			1,69
24	2	0,1	0,80	27,96	0,96	22,10	63,63	100	100,00	0,22
24	2	0,2	1,24	28,47	0,84	16,70	68,20			0,83
24	3	0,1	0,38	26,96	0,76	39,30	71,42	150	100,00	0,42
24	3	0,2	0,60	23,98	1,00	23,00	62,09			0,81
25	1	0,1	2,25	28,03	1,01	12,20	61,74	23,07	41,00	0,26
25	1	0,2	2,01	30,85	1,06	10,70	59,85			0,58
25	2	0,1	2,23	28,42	0,96	16,10	63,68	16,30	48,00	0,17
25	2	0,2	2,18	31,18	1,14	13,00	56,97			0,56
25	3	0,1	2,54	29,87	1,08	11,40	59,33	19,23	53,00	0,36
25	3	0,2	1,76	32,03	1,13	11,50	57,21			0,68
26	1	0,1	1,56	37,63	1,16	20,00	56,13	11,28	100,00	1,93
26	1	0,2	1,84	40,15	1,08	11,70	59,24			1,77
26	2	0,1	1,89	36,08	1,23	16,40	53,59	6,41	100,00	1,64
26	2	0,2	2,14	38,19	1,14	14,10	56,91			1,40
26	3	0,1	1,50	40,29	1,19	15,00	55,28	6	100,00	1,66
26	3	0,2	1,44	33,16	1,32	11,20	50,17			1,38
27	1	0,1	4,55	23,10	1,24	12,00	53,14	5	63,00	0,33
27	1	0,2	1,81	27,44	1,23	8,90	53,61			1,28
27	2	0,1	2,82	22,30	1,29	9,90	51,18	6	55,00	0,14
27	2	0,2	2,66	37,05	1,21	13,00	54,43			0,61
27	3	0,1	2,96	23,47	1,25	13,30	52,86	5	38,00	0,63

27	3	0,2	3,03	27,96	1,04	9,30	60,81			1,50
28	1	0,1	2,92	30,16	1,00	15,00	62,45	5	32,00	0,18
28	1	0,2	2,54	30,89	1,02	10,40	61,45			0,49
28	2	0,1	3,70	28,34	1,00	11,60	62,12	5	25,00	0,45
28	2	0,2	2,53	33,38	1,11	8,90	58,21			1,23
28	3	0,1	2,89	27,53	1,08	14,60	59,34	5	38,00	0,26
28	3	0,2	2,11	46,39	0,95	12,10	64,03			0,99
29	1	0,1	1,79	25,08	1,08	12,80	59,36	8,57	85,00	0,31
29	1	0,2	2,10	24,38	1,05	9,80	60,36			1,57
29	2	0,1	2,10	21,66	1,07	13,60	59,72	6,61	71,00	2,17
29	2	0,2	1,91	27,46	1,04	13,40	60,65			2,09
29	3	0,1	2,55	20,33	1,19	15,60	55,02	10,79	78,00	1,78
29	3	0,2	2,55	42,78	1,04	12,20	60,73			2,43
30	1	0,1	0,78	21,11	1,11	14,00	58,02	22,06	42,00	0,48
30	1	0,2	2,39	25,01	1,08	12,20	59,24			1,17
30	2	0,1	1,92	22,27	0,94	13,30	64,56	9,80	29,00	0,92
30	2	0,2	2,22	35,25	1,07	11,20	59,61			1,87
30	3	0,1	1,47	23,35	1,19	12,70	55,04	13,39	42,00	0,22
30	3	0,2	1,75	27,83	1,11	12,80	57,99			1,14
31	1	0,1	1,85	17,85	1,07	13,40	59,58	9,14	76,00	0,56
31	1	0,2	1,92	27,56	1,09	16,40	58,95			0,46
31	2	0,1	1,70	29,97	1,02	11,90	61,65	12,71	77,00	0,77
31	2	0,2	1,04	21,15	0,94	16,60	64,55			1,41
31	3	0,1	1,93	20,92	1,03	15,80	61,17	15,15	74,00	0,98
31	3	0,2	1,58	22,52	1,02	12,20	61,44			0,70