



***Calidad de Suelo en Agro-ecosistemas de Misiones:
Desarrollo y Validación de Índices de Calidad.
Su Aplicación en la Evaluación de los
Cambios en el Uso de las Tierras***

***Diana Marcela Toledo
Ingeniera Agrónoma***

***Tesis presentada para el otorgamiento del Grado Académico de
Doctor de la Universidad Nacional del Nordeste en el
Área de Recursos Naturales***

Directora: Ing. Agr. (Dra.) Sara Vazquez

***Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ciencias Agrarias
Departamento de Suelo y Agua
Cátedra de Edafología***

Corrientes-2014-Argentina

“Declaro que el material incluido en esta Tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.”

Felix, qui potuit rerum cognoscere causas.

Feliz, es aquél que ha podido conocer las causas de las cosas.

Latin poet Virgil: Georgics (Book II, v. 490)

JURADO DE TESIS

Directora de Tesis

Sara Vazquez

Ingeniera Agrónoma.

Doctora de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), en el
Área de Recursos Naturales.

Jurado

Lidia Giuffré

Ingeniera Agrónoma. Universidad Nacional de Buenos Aires (UBA).
Magister en Ciencias del Suelo - Universidad Nacional de Buenos Aires.

Jurado

Laura Itatí Giménez

Experta en Estadística y Computación – Facultad de Ciencias Exactas, Naturales
y de Agrimensura - Universidad Nacional del Nordeste (UNNE).
Doctora en Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Instituto Universitario
de Geología - Universidade da Coruña - España.

Jurado

Marcelo Germán Wilson

Ingeniero Agrónomo. Doctor en Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente.
Instituto Universitario de Geología - Universidade da Coruña - España.

Fecha de defensa de la presente Tesis: 19 de Septiembre de 2014.

Dedico este trabajo:

A Dios, fuente de amor y misericordia infinita.

A la memoria de mis amados padres, Lola y Pirín.

A mi esposo y compañero de la vida, Roly.

A mis hijas Virginia, Julieta y María del Cielo.

Agradecimientos

- *A la Facultad de Ciencias Agrarias, y a la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de grado y posgrado, y financiar este Doctorado.*
- *A mi directora de Tesis, Ing. Agr. (Dra.) Sara Vazquez, por su apoyo y acompañamiento permanente a lo largo de mi formación académica.*
- *A la Cátedra de Edafología, por el financiamiento de los trabajos de campo, de las determinaciones de laboratorio, de los cursos de posgrado y de las publicaciones en Revistas Científicas. A todos sus integrantes por el acompañamiento brindado, y su valiosa colaboración en las determinaciones realizadas a campo y en laboratorio. A los alumnos por su colaboración en el muestreo de los suelos.*
- *Al Dr. Germán Bollero, del Department of Crop Sciences - University of Illinois - USA, por el asesoramiento brindado.*
- *Al Dr. Juan Alberto Galantini, de la Comisión de Investigaciones Científicas, CERZOS - Dpto. Agronomía-Universidad Nacional del Sur, por su apoyo, generosidad y aporte de conocimientos.*
- *A la Ing. Agr. (MS. Sc.) Julieta Rojas, por introducirme en el Uso del Software R, por su calidez y compañerismo, y a todo el Departamento de Suelos de la EEA INTA Sáenz Peña, por hacerme sentir como en casa.*
- *A la Ing. Agr. Stella Maris Contreras Leiva, por su siempre buen criterio y compañerismo.*
- *A los productores de Misiones, que aportaron sus campos y lotes para las determinaciones y muestreos.*
- *A todo el personal del Área de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNNE), por su buena disposición y servicio.*
- *A los miembros del Jurado de Tesis, por sus correcciones y valiosos aportes.*
- *A mi amada familia por apoyar, respetar y valorar, mi dedicación a este trabajo.*

Trabajos derivados de la presente Tesis:

Publicaciones en Revistas Científicas con Referato

-Toledo, M; H Dalurzo & S Vazquez. **2010. Fosfatasa ácida en Oxisoles bajo cultivo de Tabaco.** *Revista de la Ciencia del Suelo (Argentina)*, Vol. 28 (1):33-38.

-Toledo, DM; JA Galantini; E Ferreccio; S Arzuaga; L Gimenez & S Vazquez. **2013. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados.** *Revista de la Ciencia del Suelo (Argentina)*, Vol. 31(2):201-212.

-Toledo, DM; JA Galantini; HC Dalurzo; S Vazquez & G Bollero. **2013. Methods for assessing the effects of land use changes on carbon stocks of subtropical Oxisol.** *Soil Science Society of America Journal (SSSAJ)*, 77:1542-1552.

Trabajos presentados en Congresos Nacionales e Internacionales

-Toledo, DM; JA Galantini; H Dalurzo; S Vazquez & G Bollero. **2012. Evaluación de diferentes métodos de cálculo de reservas de carbono del suelo.** XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. “Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”. Comisión Física, Química y Físico-química de los Suelos: C1-T-511. Mar del Plata, 16 al 20 de abril de 2012.

-Toledo, DM; JA Galantini; S Vazquez & S Arzuaga. **2012. Soil organic carbon stock and stratification ratio as indicators of soil quality.** 19th ISTRO Conference, (International Soil Tillage Research Organization), Montevideo, República Oriental del Uruguay. 24 al 28 de septiembre de 2012.

-Toledo, DM; JA Galantini; SM Contreras Leiva; S Arzuaga & S Vazquez. **2013. Stock e índices de estratificación de carbono como indicadores de calidad en Oxisoles.** Jornada Nacional “Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas del suelo: efectos sobre los balances de carbono”. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo – CONICET - UNS. Bahía Blanca, 8 de abril de 2013.

-**Toledo, DM;** SM Contreras Leiva; DF Fernández & S Vazquez. **2014. Indicadores e índices de calidad física en Oxisoles bajo sistemas naturales y cultivados.** XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, y II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.

-**Toledo, DM. 2014.** Disertación en la mesa redonda “La materia orgánica como un indicador de calidad de suelo”, sobre el tema: **Indicadores e índices de calidad química y biológica en Oxisoles bajo sistemas naturales y cultivados.** XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, y II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.

Trabajos presentados en Reuniones de Comunicaciones Científicas, Tecnológicas y de Extensión

-**Toledo, DM;** S Arzuaga & S Vazquez. **2010. Fracciones orgánicas y stocks de carbono y nitrógeno en suelos rojos bajo cultivo de maíz.** Nº 003. XXI Reunión de Comunicaciones Científicas, Técnicas y de Extensión de la Facultad de Ciencias Agrarias. Corrientes, Agosto, 2010.

-**Toledo, DM;** J Alejandro; S Arzuaga; S Contreras Leiva & S Vazquez. **2012. Stocks de carbono y nitrógeno en suelos rojos de Misiones bajo bosques implantados.** Nº 004. XXIII Reunión de Comunicaciones Científicas, Técnicas y de Extensión de la Facultad de Ciencias Agrarias. Corrientes, 1 al 3 de Agosto de 2012.

-**Toledo, DM;** S Arzuaga; S Contreras Leiva; L Lupi & S Vazquez. **2014. Fracciones orgánicas e Índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados.** XXIV Reunión de Comunicaciones Científicas, Técnicas y de Extensión de la Facultad de Ciencias Agrarias. Corrientes, 5 al 8 de Agosto de 2014.

RESUMEN

El objetivo general de la presente Tesis, fue seleccionar indicadores y construir índices que permitan cuantificar la calidad del suelo (CS) y monitorear su dinámica, de manera de poder establecer cuáles sistemas de cultivo resultan sustentables. El estudio se llevó a cabo en Oxisoles de la provincia de Misiones, ubicada al NE de la República Argentina. Para la obtención de indicadores y el desarrollo de índices, se emplearon sistemas naturales (selva subtropical, Sv) y cultivados (yerba mate, *Ilex paraguariensis* Hill, Yc); mandarina, *Citrus unshiu* Marc., Ci y tabaco *Nicotiana tabacum* L., Ta), aplicando un diseño en bloques completos al azar en los Departamentos de Alem, Oberá, Cainguás y Guaraní. El abordaje metodológico se realizó definiendo un nivel de referencia contra el cual se compararon y cuantificaron los cambios de CS. Suelos con vegetación clímax (selva subtropical) fueron tomados como escenario de referencia de alta calidad. Para la validación de los índices desarrollados, se emplearon sistemas naturales (selva) y cultivados (maíz, *Zea mays* L.; té, *Camellia sinensis* L.; forestal con *Pinus* sp.) mediante un diseño completamente al azar, en el Departamento de Oberá. En cada caso se tomaron muestras compuestas, al azar, a 3 profundidades: 0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m. Las variables edáficas determinadas fueron: densidad aparente (Da), densidad real (Dr), textura, pH, carbono orgánico (CO), fósforo asimilable (P), nitrógeno total (N), nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm), actividad de la fosfatasa ácida (Enz), materia orgánica particulada total (MOP), materia orgánica particulada gruesa (MOPa) y fina (MOPb), capacidad de intercambio catiónico (T), cationes intercambiables como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K), hidrógeno (H) y aluminio (Al), resistencia a la penetración (RP), estabilidad de agregados (EA), humedad equivalente (HE), infiltración básica (Ib), y respiración de suelo (Res). Por cálculo se obtuvieron: porosidad total (PT), porosidad capilar (Pc) y espacio aéreo (Eae). Los datos fueron procesados mediante la aplicación de análisis

univariado y multivariado, utilizando los programas estadísticos Infostat y R-Project. El conjunto mínimo de datos (CMD) para cada categoría de variables, en los primeros 0,30m del perfil, quedó conformado por: i) CMD de orden físico: Da, Eae, EA, HE, RP e Ib; ii) CMD de orden químico: pH, CO, N, P, K, Ca, Mg, H y Al intercambiables; y iii) CMD de orden biológico: MOP, MOPa, MOPb, Npm, Enz y Res. Se desarrollaron y calibraron seis índices de calidad de suelo, de los cuales tres índices: “Agregación” (IF-30-1), “Fertilidad” (IQ-30-1), y “Actividad biológica” (IB-30-1), resultaron válidos, sensibles a las perturbaciones antrópicas, y efectivos para cuantificar la calidad de los suelos y evaluar los efectos del cambio en el uso de las tierras. Los índices validados (IF-30-1; IQ-30-1, IB-30-1), indicaron que todos los sistemas agrícolas bajo estudio produjeron pérdida de calidad física ($S_v > Y_c > C_i > T_a$), química ($S_v > C_i = T_a > Y_c$) y biológica ($S_v > C_i > T_a = Y_c$). Los índices químicos y biológicos, determinados en base a formulaciones encontradas en la bibliografía, señalaron al sistema bajo Yerba mate como el más degradante, coincidiendo con el orden de calidad de suelo señalado por los índices químico (“Fertilidad”) y biológico (“Actividad biológica”), desarrollados en la presente Tesis.

ABSTRACT

The overall objective of this Thesis was to select indicators and develop indices to assess soil quality and monitor soil dynamics, and thus be able to determine which cropping systems turn out to be sustainable. The experiment was carried out in Oxisols of Misiones, a province located in the northeast of Argentina. In order to obtain indicators and develop indices, we used natural (subtropical forest, Sv) and cultivated systems (yerba mate, *Ilex paraguariensis* Hill, Yc; mandarin, *Citrus unshiu* Marc., Ci; and tobacco, *Nicotiana tabacum* L., Ta). A randomized complete block design was established at the departments of Alem, Oberá, Cainguás and Guaraní. The methodological approach consisted in determining a reference level against which changes in soil quality were compared and quantified. Climax vegetation (subtropical forest) soils were taken as high quality reference soils. For validation of the indices developed, we used natural (rainforest) and cultivated systems (corn, *Zea mays* L.; tea, *Camellia sinensis* L.; forest with *Pinus* sp.) in a completely randomized design at the department of Oberá. In each case, composite samples were collected at random to three depths: 0-0.10; 0.10-0.20; and 0.20-0.30 m. The following edaphic variables were determined: bulk density (Da), real density (Dr), texture, pH, organic carbon (CO), assimilable phosphorus (P), total nitrogen (N), potentially mineralizable nitrogen (Npm), acid phosphatase activity (Enz), particulate organic matter (MOP), coarse particulate organic matter (MOPa) and fine (MOPb), cation-exchange capacity (T), exchangeable cations as calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K), exchangeable hydrogen (H) and aluminum (Al), penetration resistance (RP), aggregate stability (EA), equivalent moisture (HE), basic infiltration (Ib) and soil respiration (Res); on the other hand, total porosity (PT), capillary porosity (Pc) and air space (Eae) were determined by calculation. The data were processed by applying the univariate and multivariate analysis with the Infostat and R-Project statistical software. For each category of variables and in the top 0.30 m of the profile, the minimum

data set (CMD) included i) CMD of physical attributes: Da, Eae, EA, HE, RP and Ib; ii) CMD of chemical attributes: pH, CO, N, P, K, Ca, Mg, exchangeable H and Al; and iii) CMD of biological attributes: MOP, MOPa, MOPb, Npm, Enz and Res. Six soil quality indices were developed and calibrated; three of them –‘aggregation’, IF-30-1; ‘fertility’, IQ-30-1 and ‘biological activity’, IB-30-1– turned out to be valid, sensitive to anthropic disturbances and effective enough to quantify soil quality and to assess the effects of land-use changes. The validated indices (IF-30-1; IQ-30-1, IB-30-1), indicated that all the agricultural systems under study resulted in physical ($S_v > Y_c > C_i > T_a$), chemical ($S_v > C_i = T_a > Y_c$) and biological ($S_v > C_i > T_a = Y_c$) quality loss. Chemical and biological indices obtained from formulations found in the literature showed that the system under yerba mate turned out to have the highest negative impact on soil quality, in coincidence with the type of soil quality determined by the chemical and biological indices developed in this Thesis.

ÍNDICE

<u>PARTE I: INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	Pág.
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES, HIPÓTESIS, OBJETIVOS	
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 Fundamentos teóricos del concepto “Calidad del suelo”	2
1.1.2 Evaluación de la calidad del suelo.....	5
1.1.3 Parámetros físicos, químicos y biológicos, en el estudio de la calidad de los suelos.....	6
1.1.4 Selección de indicadores de calidad y obtención de índices.....	10
1.1.5 Estudios de calidad de suelo en Argentina.....	14
1.2 HIPOTESIS.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
CAPÍTULO 2: ÁREA BAJO ESTUDIO, DISEÑO EXPERIMENTAL, MUESTREO, VARIABLES ÉDAFICAS	
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL AREA BAJO ESTUDIO.....	24
2.1.1 Ubicación geográfica y clima.....	24
2.1.2 Región ecológica.....	24
2.1.3 Vegetación.....	25
2.1.4 Morfología, Geología y Suelos.....	25
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL, MUESTREO DE SUELOS Y VARIABLES EDÁFICAS.....	26
2.2.1 Para la obtención de indicadores, el desarrollo y la aplicación de índices de calidad.....	30
2.2.2 Para la validación de los índices de calidad desarrollados.....	32
2.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES EDÁFICAS.....	33
2.3.1 Acondicionamiento de las muestras de suelo.....	33

2.3.2 Densidad aparente.....	33
2.3.3 Densidad de partículas.....	34
2.3.4 Textura.....	34
2.3.5 Humedad equivalente.....	34
2.3.6 Estabilidad de agregados.....	35
2.3.7 Espacio aéreo.....	35
2.3.8 Porosidad capilar.....	35
2.3.9 Porosidad total.....	36
2.3.10 Infiltración básica.....	36
2.3.11 Resistencia a la penetración.....	36
2.3.12 pH.....	36
2.3.13 Carbono orgánico.....	36
2.3.14 Nitrógeno total.....	37
2.3.15 Fósforo disponible.....	37
2.3.16 Capacidad de intercambio catiónica efectiva.....	38
2.3.17 Calcio, magnesio, y potasio intercambiables.....	38
2.3.18 Acidez (H) y aluminio intercambiables.....	38
2.3.19 Materia orgánica particulada.....	39
2.3.20 Nitrógeno potencialmente mineralizable.....	39
2.3.21 Actividad enzimática de la fosfatasa ácida.....	39
2.3.22 Respiración de suelo	40
2.3.23 Stock de carbono	40
2.3.24 Relaciones entre indicadores químicos y biológicos asociados a la materia orgánica del suelo.....	42

PARTE II: SELECCIÓN DE INDICADORES Y DESARROLLO DE ÍNDICES

CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO

3.1 INTRODUCCIÓN.....	44
3.2 OBJETIVOS.....	48
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.3.1 Categorías de variables.....	49
3.3.2 Análisis estadístico.....	49
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.4.1 Indicadores físicos.....	51
3.4.2 Indicadores químicos.....	59
3.4.3 Indicadores biológicos.....	66
3.5 CONCLUSIONES.....	72

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE ÍNDICES DE CALIDAD

4.1 INTRODUCCIÓN.....	73
4.2 OBJETIVO.....	74
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	75
4.3.1 Número de componentes principales a considerar.....	76
4.3.2 Selección de indicadores dentro de cada componente principal.....	76
4.3.3 Construcción de índices de calidad y puntuaciones.....	77
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
4.4.1 ÍNDICES DE CALIDAD FÍSICA.....	79
4.4.1.1 Selección del número de componentes.....	79
4.4.1.2 Selección de atributos de calidad dentro de cada componente principal.....	80
4.4.1.3 Construcción de índices de calidad física.....	81
4.4.1.4 Puntuaciones de los índices de calidad física para los distintos usos de suelo.....	83

4.4.2 ÍNDICES DE CALIDAD QUÍMICA.....	84
4.4.2.1 Selección del número de componentes.....	85
4.4.2.2 Selección de atributos de calidad dentro de cada componente principal.....	86
4.4.2.3 Construcción de índices de calidad química.....	88
4.4.2.4 Puntuaciones de los índices de calidad química para los distintos usos de suelo.....	90
4.4.3 ÍNDICES DE CALIDAD BIOLÓGICA.....	91
4.4.3.1 Selección del número de componentes.....	92
4.4.3.2 Selección de atributos de calidad dentro de cada componente principal.....	92
4.4.3.3 Construcción de índices de calidad biológica.....	94
4.4.3.4 Puntuaciones de los índices de calidad biológica para los distintos usos de suelo.....	94
4.5 CONCLUSIONES.....	96
<u>PARTE III: VALIDACIÓN DE LOS ÍNDICES DESARROLLADOS Y APLICACIÓN DE ÍNDICES PREEXISTENTES</u>	
CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN DE LOS ÍNDICES DESARROLLADOS	
5.1 INTRODUCCIÓN.....	97
5.2 OBJETIVO.....	98
5.3 MATERIALES y MÉTODOS.....	98
5.3.1 Validación a partir de la aplicación de los índices a otros sistemas naturales y cultivados.....	98
5.3.2 Validación en base a diferencias de residuales.....	101
5.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	102
5.4.1 Validación a partir de la aplicación de los índices a otros sistemas naturales y cultivados.....	102
5.4.2 Validación en base a los residuales.....	107
5.5 CONCLUSIONES.....	110
CAPÍTULO 6: APLICACIÓN DE FORMULACIONES PREEXISTENTES PARA EVALUAR CALIDAD DE SUELOS	
6.1 INTRODUCCIÓN.....	111

6.2 EL STOCK DE CARBONO COMO ÍNDICE DE CALIDAD DE SUELO.....	111
6.2.1 Objetivos.....	112
6.2.2 Hipótesis.....	113
6.2.3 Materiales y métodos.....	113
6.2.4 Resultados y discusión.....	115
6.3 RELACIONES ENTRE INDICADORES QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS COMO ÍNDICES DE CALIDAD.....	118
6.3.1 Objetivo.....	120
6.3.2 Materiales y métodos.....	120
6.3.3 Resultados y discusión.....	121
6.3.3.1 Índice de labilidad.....	122
6.3.3.2 Índice de reserva de carbono.....	122
6.3.3.3 Índice MOP/MOT.....	122
6.3.3.4 Índice Npm/N.....	123
6.3.3.5 Índice MOP/Res.....	123
6.3.3.6 Índices de estratificación.....	124
6.4 CONCLUSIONES.....	126
<u>PARTE IV: CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES</u>	
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES E IMPACTO	
7.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	128
7.2 IMPACTO ESPERADO.....	130
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	131
ANEXO.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 2.1: Ubicación de los Departamentos Leandro Alem, Oberá, Cainguás y Guaraní (Misiones).	27
Figura 2.2: Zonas Agro-Ecológicas (ZAE) de la Provincia de Misiones	28
Figura 2.3: Zonas Agroeconómicas Homogéneas (ZAH) de la Provincia de Misiones	29
Figura 3.1: Círculo de correlaciones con la representación de las variables físicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0-0,10 m.	52
Figura 3.2: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables físicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0-0,10 m.	52
Figura 3.3: Círculo de correlaciones con la representación de las variables físicas respecto a las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0,10-0,20 m.	53
Figura 3.4: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables físicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0,10-0,20 m.	54
Figura 3.5: Círculo de correlaciones con la representación de las variables físicas respecto a las componentes 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,20-0,30 m.	55
Figura 3.6: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables físicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0,20-0,30 m.	56
Figura 3.7: Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes 1 y 2 construidas para la profundidad de 0-0,10 m.	59
Figura 3.8: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables químicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, de 0-0,10 m.	60
Figura 3.9: Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,10-0,20m.	61
Figura 3.10: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables químicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2.	61
Figura 3.11: Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,20-0,30 m.	62
Figura 3.12: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables químicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, de de 0,20-0,30 m.	62
Figura 3.13: Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0-0,10m.	66
Figura 3.14: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables biológicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2.	67
Figura 3.15: Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,10-0,20m.	67
Figura 3.16: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables biológicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano	68

principal producido por las componentes 1 y 2, de 0,10-0,20 m.	
Figura 3.17: Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes 1 y 2, de 0,20-0,30 m.	68
Figura 3.18: Gráfico de <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP variables biológicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, de 0,20-0,30m.	69
Figura 4.1: Gráfico de codo ó scree plot para las propiedades físicas de 0-0,30 m.	79
Figura 4.2. Visualización de los coeficientes de correlación entre variables físicas y las CP1 y CP2.	82
Figura 4.3: Gráfico <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP propiedades físicas: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes ó dimensiones 1 y 2, de 0-0,30 m..	83
Figura 4.4: Gráfico de codo o Scree plot de propiedades químicas de 0-0,30 m.	85
Figura 4.5. Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2, de 0-0,30 m.	89
Figura 4.6: Gráfico <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP de las variables químicas: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes ó dimensiones 1 y 2, de 0-0,30 m.	89
Figura 4.7: Gráfico de codo o Scree plot de propiedades biológicas de 0-0,30 m.	92
Figura 4.8. Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes o dimensiones 1 y 2, de 0 a 0,30 m.	93
Figura 4.9: Gráfico <i>Bi-plot</i> correspondiente al ACP de las variables biológicas: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes ó dimensiones 1 y 2, de 0 a 0,30 m.	93
Figura 5.1: Residuales medios obtenidos para el índice de calidad física IF-30-1 ("Agregación") bajo los distintos sistemas del Departamento de Oberá (Misiones).	108
Figura 5.2: Residuales medios obtenidos para el índice de calidad química IQ-30-1 ("Fertilidad") bajo los distintos sistemas del Departamento de Oberá (Misiones).	109
Figura 5.3: Residuales medios obtenidos para el índice de calidad biológica IB-30-1 ("Actividad biológica") bajo los distintos sistemas del Departamento de Oberá (Misiones).	109
Figura 6.1: Relaciones de estratificación del COSr ₁ bajo los diferentes tratamientos en Oxisoles de Misiones.	125
Figura 6.2: Relaciones de estratificación del COSr ₂ bajo los diferentes tratamientos en Oxisoles de Misiones.	125
ANEXO-Figura 1: Mapa político de la República Argentina, en color verde, la Provincia de Misiones.	150
ANEXO-Figura 2: Mapa climático de la República Argentina.	151
ANEXO-Figura 3: Mapa de Eco-regiones de la República Argentina.	152
ANEXO-Foto 1: Calicata bajo sistemas naturales (selva subtropical; Departamento Oberá, Coord.: 27°29'56" Lat. S. y 55°08'39" Long.).	156
ANEXO-Foto 2: Calicata bajo sistemas cultivados (Té; Departamento Oberá, Coord.: 27°25'42" Lat. S. y 55°07'04" Long. O.).	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 3.1: Resultados del análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$) para las variables físicas evaluadas para las profundidades: 0-0,10 m; 0,10-0,20 m y 0,20-0,30 m, en los sistemas correspondientes a la Etapa I.	57
Tabla 3.2: Resultados del análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$) para las variables químicas evaluadas para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m; 0,10-0,20 m y 0,20-0,30 m en los sistemas correspondientes a la Etapa I.	64
Tabla 3.3: Resultados del análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$) para las variables biológicas evaluadas para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m; 0,10-0,20 m y 0,20-0,30 m en los sistemas correspondientes a la Etapa I.	70
Tabla 4.1: Descomposición de la variabilidad por componente principal (CP) para las variables físicas en los primeros 0,30 m del perfil de suelo.	79
Tabla 4.2: Autovectores de las componentes principales CP1 y CP2, para las variables físicas	80
Tabla 4.3: Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre las variables físicas y las componentes principales, para la profundidad de 0 a 0,30m. $N=144$. $\text{Prob} > r$, bajo H_0 : $\text{Rho}=0$	81
Tabla 4.4: Puntuaciones o “scores” para los índices de calidad física del suelo, bajo los sistemas selva (Sv), citrus (Ci), yerba mate (Yc) y tabaco (Ta). Anova y Prueba LSD ($p < 0,05$).	83
Tabla 4.5: Primeras 5 componentes principales obtenidas para las 9 variables químicas evaluadas en los 0,30 m del perfil de suelo, sus autovalores, proporción de variancia explicada y variancia acumulada.	85
Tabla 4.6: Autovectores de las 3 componentes seleccionadas para las variables químicas.	86
Tabla 4.7: Correlaciones entre las variables químicas y las componentes principales, para la profundidad de 0 a 0,30 m. $N=144$. $\text{Prob} > r$, bajo H_0 : $\text{Rho}=0$.	87
Tabla 4.8: Puntuaciones o “scores” obtenidos para los índices de calidad química, bajo los sistemas selva (Sv), citrus (Ci), yerba mate (Yc) y tabaco (Ta). Anova y Prueba LSD ($p < 0,05$).	90
Tabla 4.9: Primeras 5 componentes principales obtenidas para las variables biológicas evaluadas en los 0,30 m del perfil de suelo, sus autovalores, proporción de variancia explicada y variancia acumulada.	91
Tabla 4.10: Autovectores de la componente seleccionada. Se señalan con negrita a la carga máxima y con *, a aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas $> 2/3$ de la carga máxima.	92
Tabla 4.11: Puntuaciones o “scores” para el índice de calidad biológica del suelo, bajo los sistemas selva (Sv), citrus (Ci), yerba mate (Yc) y tabaco (Ta). Anova y Prueba LSD ($p < 0,05$).	95
Tabla 5.1: Puntuaciones o “Scores” de los índices de calidad física correspondientes a los distintos usos de suelo: selva subtropical (SV), cultivo de maíz (Mz), cultivo de té (Té) y forestal de <i>Pinus sp.</i> (Pi). ANOVA y Prueba LSD ($p < 0,05$).	102
Tabla 5.2: Puntuaciones o “Scores” de los índices de calidad química correspondientes a los distintos usos de suelo: selva subtropical (SV), cultivo de maíz (Mz), cultivo de Té (Té) y forestal de <i>Pinus sp.</i> (Pi). ANOVA y Prueba LSD ($p < 0,05$).	105

Tabla 5.3: Puntuaciones o “Scores” de los índices de calidad biológica correspondientes a los distintos usos de suelo: selva subtropical (SV), cultivo de maíz (Mz), cultivo de Té (Té) y forestal de <i>Pinus sp.</i> (Pi). ANOVA y Prueba LSD ($p < 0,05$).	106
Tabla 5.4: Medias de residuales obtenidos para los índices de calidad física (IF), química (IQ) y biológica (IB) calculados para los primeros 0,30m de profundidad para los sistemas del Departamento de Oberá (Misiones): sistema natural (SV), sistemas agrícolas: té y maíz (Mz) y sistema forestal bajo <i>Pinus sp</i> (Pi).	108
Tabla 6.1: Simulación basada en las medias para C y Da correspondientes a la situación original (Da_0), manteniendo constantes las concentraciones de C, e incrementando 15, 30, 50, 70 y 90% la Da respecto a la Da_0 simulando una compactación del suelo.	115
Tabla 6.2: Stocks de carbono simulados ($Mg\ C\ ha^{-1}$) para una profundidad de 0 a 0,30 m sobre la base de los distintos métodos de cálculo aplicados.	116
Tabla 6.3: Valores medios de stock de carbono de 0 a 0,30 m calculados a partir de la aplicación del método basado en una profundidad de masa equivalente (ESL) y del método gráfico basado en coordenadas de material mineral y de C (SCM), en los sistemas selva subtropical (Sv), cultivo de citrus (Ci), tabaco (Ta) y yerba mate (Yc).	117
Tabla 6.4: Índices funcionales obtenidos a partir de formulaciones preexistentes y relaciones generadas en esta Tesis, a partir de datos provenientes de los sistemas de la etapa 1: selva subtropical (Sv), cultivo de citrus (Ci), cultivo de yerba mate (Yc) y cultivo de tabaco (Ta).	121
Anexo- Tabla I: Perfil característico correspondiente a Oxisoles.	153
Anexo- Tabla II: Caracterización de los suelos utilizados en la validación de los índices desarrollados. Datos analíticos de los suelos bajo sistemas naturales y cultivados.	154
Anexo- Tabla III: Valores medios obtenidos para los indicadores físicos de calidad, análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$), en los sistemas de la Etapa II: selva (SV), té (Té), maíz (Mz) y pino (Pi).	158
Anexo- Tabla IV: Valores medios obtenidos para los indicadores químicos de calidad, análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$), en los sistemas de la Etapa II: selva (SV), té (Té), maíz (Mz) y pino (Pi).	159
Anexo- Tabla V: Valores medios obtenidos para los indicadores biológicos de calidad, análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$), en los sistemas de la Etapa II: selva (SV), té (Té), maíz (Mz) y pino (Pi).	160
Anexo- Tabla VI: Límites de calibración: Valores mínimos y máximos correspondientes a los distintos atributos de suelo que conformaron los índices de calidad desarrollados por análisis de componentes principales, a partir de los sistemas de la Etapa I (selva subtropical, yerba convencional, tabaco y citrus).	161

PARTE I: INTRODUCCIÓN GENERAL

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES, HIPÓTESIS, OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES

Hasta hace algunos años, en la mayoría de los países del mundo, la producción de cultivos se concentraba en la obtención de mayores rendimientos o retornos económicos, sin prever el impacto sobre el medio ambiente.

En la actualidad, la agricultura global enfrenta grandes desafíos: la producción de alimentos para satisfacer una población creciente, el nuevo escenario de la producción de biocombustibles con el consecuente aumento de la superficie cultivada, el aumento de la degradación de los recursos, y la importancia de considerar prácticas amigables con el medio ambiente (Giuffré *et al.*, 2008).

El uso del suelo provoca alteraciones en los atributos del mismo, que pueden significar pérdida de calidad, siendo la degradación de los suelos uno de los principales problemas medioambientales que afecta a la humanidad, impactando no sólo en la capacidad productiva, sino también en la calidad ambiental (Reicosky, 2007).

Como consecuencia del uso y manejo inapropiado de la tierra, los suelos cultivados sufren pérdidas que van de dos tercios a la mitad del pool original de carbono orgánico (Lal, 2004).

El conocimiento y la cuantificación del impacto del uso, sobre la calidad del suelo (CS), son fundamentales en el desarrollo de sistemas productivos sustentables, tanto desde el punto de vista ambiental como económico (Cardoso Niero *et al.*, 2010).

La determinación científica de la CS, resulta necesaria para evaluar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas (Franzluebbers, 2008), y constituye una herramienta fundamental a la hora de tomar decisiones de manejo para lograr una agricultura sustentable (Andrews *et al.*, 2002), que contribuya a la calidad

ambiental a través de la mitigación de los gases efecto invernadero (GEI) (Mosier, 1998; Franzluebbers, 2005).

1.1.1 Fundamentos teóricos del concepto “calidad del suelo”

La idea del concepto "calidad del suelo" y su aplicación, fue introducida hace más de treinta años, y si bien su mayor desarrollo y adopción se produjo en los últimos veinte años, su concepto y aplicación están en constante evolución (Astier-Calderón *et al.*, 2002; Bastida *et al.*, 2008).

La CS es un elemento clave de la agricultura sustentable (Warkentin, 1995), está íntimamente relacionada a la calidad ambiental, a la sustentabilidad de los sistemas de cultivo y a la salud vegetal, animal y humana (Doran & Zeiss, 2000).

Los suelos realizan variadas funciones esenciales que afectan la producción de alimentos y fibras. El término calidad del suelo, implica reconocer las funciones del mismo (Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997):

1. Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible).
2. Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental).
3. Favorecer la salud de plantas, animales y humanos.

Al desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el sustrato básico para las plantas; capta, retiene y proporciona agua y nutrientes; además de ser un filtro ambiental efectivo (Larson & Pierce, 1991; Buol, 1995).

Para Gregorich *et al.* (1994), la CS es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico. Arshad y Coen (1992), le dieron al concepto una connotación más ecológica, y la definieron como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales, y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano.

La evaluación de la CS, es hoy en día un campo promisorio en constante evolución dentro de la ciencia agrícola, y orientado al desarrollo de una

producción sustentable (Qi *et al.*, 2009). Así, conocer el efecto de las prácticas de manejo y del uso del suelo sobre la CS y sus atributos, ha sido identificada como una de las más importantes metas de la ciencia del suelo moderna (Wang & Gong, 1998), siendo un nuevo paradigma en la evaluación espacial y temporal de los efectos del uso sobre la capacidad de los suelos para funcionar (Erkossa *et al.*, 2007).

Las definiciones más recientes de calidad, se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico (Singer & Ewing, 2000).

Dada las múltiples funciones del suelo: producción, hidrológica, de almacenamiento de agua, nutrientes y energía; sostenibilidad y calidad ambiental, de control de la contaminación; de espacio para el desarrollo de la vida entre otras (FAO, 1995; Cruz *et al.*, 2004), la calidad es más bien relativa que absoluta, siendo entonces multifuncional (De la Rosa, 2008).

El Comité para la salud del suelo, de la Soil Science Society of America, aceptó la definición de CS, como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de ciertos límites naturales y antrópicos del ecosistema, sustentar la productividad vegetal y animal, mantener la calidad del agua y del aire, promover la salud de plantas, animales y soportar la habitabilidad y salud del hombre” (Larson & Pierce, 1991; Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997; De la Rosa, 2008). Se trata de un concepto holístico, que reconoce al suelo como parte de un sistema de producción diverso y dinámico, con atributos físicos, químicos y biológicos, que se pueden cuantificar en escalas temporales específicas, reconoce también los distintos roles de los suelos en los agroecosistemas y en los sistemas naturales (Karlen *et al.*, 1997; Sánchez *et al.*, 2003).

Desde el punto de vista agrícola, la CS puede ser definida como la capacidad del suelo para soportar el desarrollo de los cultivos sin degradarse ni perjudicar el medio ambiente (De la Rosa, 2008). Se relaciona con un gran número de propiedades físicas, químicas, y biológicas ó bioquímicas, y su evaluación

requiere la selección de aquellas propiedades más sensibles a los cambios producidos por el uso y las prácticas de manejo (Trasar-Cepeda *et al.*, 1999; Sánchez-Marañón *et al.*, 2002).

Mantener o mejorar la calidad, es un factor clave en el sostenimiento del recurso suelo en todo el mundo. Suelos de alta calidad no sólo tendrán mejores producciones de alimentos o fibras, para cubrir las necesidades de la población mundial que va en aumento, sino que cumplirán un mejor rol en la estabilización natural de los ecosistemas y favorecerán la calidad del aire y del agua (Gregorich *et al.*, 1994).

En base a la compleja naturaleza del sistema-suelo, se pueden distinguir dos tipos de calidad: inherente y dinámica (De la Rosa, 2008).

La calidad inherente del suelo, es intrínseca, debida a su composición, es función del material geológico, del material parental y de la topografía, siendo la mineralogía y la distribución del tamaño de partículas, estáticas o de poco cambio. Es el resultado de los factores: clima, topografía, vegetación, material parental y tiempo (Jenny, 1941), y está gobernada por los procesos formadores de manera que cada suelo tiene una capacidad natural para funcionar (Pierce & Larson, 1993). Puede ser definida por un rango de valores óptimos de propiedades del suelo que reflejan el potencial ideal del mismo para cumplir una función específica (Karlen *et al.*, 1997).

La calidad dinámica, es debida a factores extrínsecos, está relacionada con la producción de cultivos, y comprende todas las propiedades que pueden cambiar en respuesta al uso y manejo antrópicos y que están fuertemente influenciadas por las prácticas agronómicas (Pierce & Larson, 1993). Hace referencia a la dinámica natural de los suelos influenciados por el clima, el uso y manejo antrópico. Así, se asume que si un suelo está funcionando a su potencial ideal para un uso específico, éste tiene una excelente calidad; mientras que si está

funcionando por debajo de ese potencial, se puede concluir que ha disminuido o perdido calidad (Karlen *et al.*, 1997).

La calidad inherente, es utilizada para comparar un suelo con otro, y para pronosticar o estimar el valor o aptitud de los suelos para usos específicos; en tanto que la calidad dinámica, también llamada “salud del suelo” depende de las propiedades más fácilmente cambiantes y son objeto de estudio en el monitoreo de los suelos (De la Rosa, 2008).

Los cambios pueden no ser detectados de inmediato, debido a que el suelo es un sistema complejo en el cual ocurren interacciones e interrelaciones entre las distintas propiedades, y a su vez porque presenta una resiliencia y una capacidad de regular o amortiguar los cambios producidos por condiciones externas.

Así mismo, es difícil distinguir si los cambios son el resultado del desarrollo natural, ó de influencias externas no naturales (Andrews *et al.*, 2004; De La Rosa, 2008).

1.1.2 Evaluación de la calidad del suelo:

La sustentabilidad de los sistemas y de las prácticas de manejo, pueden ser evaluadas a través del estudio de la calidad del suelo (Shukla *et al.*, 2006), la cual no se puede medir directamente, pero se puede inferir a través de la determinación de atributos que sirven de indicadores (Bredja *et al.*, 2000) y la comparación de los resultados obtenidos para evaluar las consecuencias de los diferentes sistemas y/o prácticas (Karlen *et al.*, 1997; Giuffré *et al.*, 2006).

La evaluación y seguimiento de los cambios, mediante la obtención de indicadores hace posible evaluar las ganancias y pérdidas de calidad (Mariscal Sancho, 2008). De manera que la evaluación de la misma, consiste en valorar y explicar los cambios sucedidos en el suelo en el espacio y en el tiempo, a través de parámetros que valoran el cumplimiento de sus funciones (Doran & Parkin, 1994).

Se consideran como indicadores de calidad (IC), a las propiedades y procesos edáficos que resultan ser sensibles a los cambios en las funciones del suelo (Doran & Jones, 1996). Dependiendo del tipo de funcionalidad que esté bajo estudio, las propiedades seleccionadas para medir la CS pueden variar (Nortcliff, 2002; Etchevers *et al.*, 2009).

Una mejora en la calidad a menudo se indica por el aumento de: la infiltración, la aireación, la macroporosidad, el tamaño y estabilidad de los agregados, y la materia orgánica del suelo; y por una disminución de: la densidad aparente, la resistencia a la penetración de la raíces, la erosión y la pérdida de nutrientes, siendo importante incluir además los efectos sobre las propiedades biológicas ya que influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo (Parr *et al.*, 1992).

Los IC pueden ser reunidos en 4 grupos: físicos, químicos, biológicos, y visuales o cualitativos (NRCS-USDA, 1996), en la presente tesis se han considerado los 3 primeros grupos.

1.1.3 Parámetros físicos, químicos y biológicos, en el estudio de la calidad de los suelos

La materia orgánica del suelo (MO), es considerada un importante indicador de calidad y de sustentabilidad (Reeves, 1997). Muchos autores concuerdan en que es un atributo sensible a los cambios y la consideran un indicador universal debido a su gran influencia en las funciones del suelo, en su calidad, y en la productividad (Rasmussen & Collins, 1991; Kapkiyai *et al.*, 1999; Shukla *et al.*, 2004; Galantini & Rosell, 2006), como así también por sus funciones ambientales, como captura de carbono y sus efectos en la calidad del aire (Lal, 2002; FAO, 2002).

La MO, está compuesta por fracciones de diferente labilidad, las más lábiles como la materia orgánica particulada (MOP), corresponde al material más joven (Cambardella & Elliot, 1993), y es renovable en períodos cortos, aproximadamente 10 años (Jansen, 1997 Cit. Haynes, 2005). Es considerada

junto con el potencial de mineralizar nitrógeno (Npm), indicadores tempranos de CS (Fabrizzi *et al.*, 2003; Galvis-Spínola & Hernández-Mendoza, 2004), siendo sensibles a la calidad de la MO (Drinkwater *et al.*, 1996).

La MOP tiene influencia sobre varios indicadores de orden físico, químico y biológico (Galantini & Suñer, 2008), y es más sensible a los efectos del uso de la tierra, motivo por el cual puede utilizarse como un indicador del efecto de la rotación de cultivos, de la fertilización y del sistema de labranza sobre la CS (Six *et al.*, 2002). Sin embargo, los factores que influyen en su concentración y la relación con otras fracciones orgánicas no son bien conocidos (Galantini *et al.*, 2008).

Tanto la materia orgánica total (MOT) como las fracciones más lábiles, pueden afectar a las propiedades químicas, particularmente al contenido de nutrientes disponibles para las plantas (Haynes, 2005), como así también a las propiedades físicas ya que junto a los organismos vivientes asociados, juegan un papel principal en la agregación del suelo en diferentes escalas de su organización tanto a micro como a macronivel (Tisdall & Oades, 1982). Los microorganismos modifican la estabilidad de los agregados (p. ej. aumentando la cohesión de los agregados a través de sustancias aglutinantes, construyendo un entramado físico o aumentando la hidrofobicidad), no obstante en suelos ferralíticos los agentes agregantes dominantes son los óxidos de hierro (Cosentino & Chenu, 2008), estando la agregación y los procesos de captura de carbono estrechamente asociados (Angers & Chenu, 1998).

Cualquier decisión de manejo que tienda a alterar la dinámica de estas fracciones de la MO, tendrá incidencia sobre el ambiente químico-bioquímico y físico del suelo (Six *et al.*, 1999). La dirección que tomen los cambios en el contenido de MO, estará sujeta a las condiciones de precipitación, temperatura y a atributos del suelo como capacidad de retención de agua y textura (Aparicio & Costa, 2007; Lal, 2004). Por lo tanto, cuando se toman los contenidos de MO

como indicador de calidad, su utilización queda restringida a sitios con similares condiciones climáticas y edáficas (Quiroga & Funaro, 2004). La relación MOP/MOT es también un importante indicador del efecto de diferentes manejos que modifican el aporte de carbono o su velocidad de descomposición (Galantini et al, 2008).

La MO es de especial interés en los suelos tropicales, ricos en arcillas de baja actividad, como los Ultisoles y Oxisoles en los que la capacidad de intercambio de cationes, aumenta principalmente en función del contenido de MO (Robert 1996 Cit. FAO, 2002). Six *et al.* (2000), señalaron que en suelos rojos, caoliniticos, ricos en óxidos, se observa un menor efecto del manejo sobre las propiedades físicas como la agregación y la estabilidad de agregados, debido a que la influencia de la MO sobre éstas es menor, siendo más relevantes en estos suelos las interacciones electrostáticas entre los componentes minerales.

Investigadores como Arshad & Coen (1992), propusieron indicadores físicos y químicos de CS como: profundidad efectiva, capacidad de almacenamiento de agua disponible, densidad aparente, resistencia a la penetración, conductividad hidráulica, estabilidad de agregados, materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, pH, conductividad eléctrica y sodio intercambiable.

Wander *et al.* (1994), destacaron la necesidad de contar con medidas de calidad de la materia orgánica del suelo, considerando que la materia orgánica biológicamente activa (MOP) constituye la mayor reserva de nutrientes.

Autores como Doran & Parkin (1996), Doran & Jones (1996), señalaron la necesidad de determinar indicadores físicos, químicos y biológicos como: textura, infiltración, densidad aparente, profundidad del suelo, de la capa superficial y de enraizamiento, drenaje y capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, pH, MO, nitrógeno total (N), fósforo disponible (P), potasio extraíble (K), carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm), y respiración del suelo (Res).

Needelman *et al.* (1999), evaluaron atributos biológicos como MOP, Npm y biomasa microbiana a la hora de estudiar el impacto de las labranzas.

Wander & Bollero (1999), evaluaron el impacto de la introducción de la labranza cero en el estado de Illinois (USA), en base a atributos de calidad física como: densidad aparente, resistencia a la penetración, infiltración; de calidad química como: pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico, N, P, K, calcio (Ca), magnesio (Mg), y de calidad biológica como MOP, Npm, carbono de la biomasa microbiana, respiración y carbono soluble; y concluyeron que las propiedades físicas y biológicas del suelo fueron las más afectadas por las prácticas agronómicas.

Muchas propiedades microbiológicas y bioquímicas, han sido recientemente definidas como buenos indicadores de calidad entre ellos la biomasa microbiana, la actividad microbiana, la estructura de la comunidad microbiana, y la actividad enzimática (He *et al.*, 2003).

Las mediciones microbiológicas complejas y las variables provistas por las mismas como uniformidad catabólica, ácidos grasos metil-éster totales, biomasa fúngica/biomasa bacteriana, ácidos grasos saturados/mono-insaturados entre otros, pueden ser muy útiles para evaluar los cambios en la calidad según el sistema de manejo; no obstante, su utilidad al ser incluidas dentro de un índice compuesto por variables físicas, químicas y bioquímicas, no se justifica si se considera el escaso aumento en sensibilidad que las mismas otorgan al índice al ser combinadas con otro tipo de variables más sencillas y económicas (Romaniuk, 2010).

La selección de las mejores prácticas agrícolas y sistemas de manejo sustentables para cada suelo y condición, se debería basar en el conocimiento previo de la calidad física y biológica por separado, ya que la primera obedece a cambios en el largo plazo y la segunda a cambios en el corto plazo, por su mayor

dinamismo y sensibilidad a prácticas agronómicas como enmiendas, rotaciones de cultivo, labranzas conservacionistas (De la Rosa, 2008).

Es necesario determinar la CS y monitorear sus cambios, en primer lugar para identificar áreas problemáticas, y en segundo lugar para asegurar la promoción de prácticas de manejo que favorezcan la productividad y sostenibilidad del agroecosistema (Torres *et al.*, 2006), para lo cual se requiere el desarrollo de indicadores cuantitativos (Ebert & Welch, 2004).

1.1.4 Selección de indicadores de calidad y obtención de índices

Los indicadores de calidad (IC), varían de acuerdo al tipo de suelo, sistema de manejo y condiciones ambientales (entre otros factores), motivo por el cual no se debería poner énfasis en presentar un conjunto mínimo universal (CMI Universal), sino en plantear una metodología de selección mediante la cual puedan obtenerse los indicadores apropiados para cada situación en particular (Romaniuk, 2010).

Considerando que el suelo es un sistema complejo y que la CS tiene que ver con su funcionamiento, su evaluación requiere de la medición de muchos parámetros del suelo, y esto no siempre es factible, por cuanto es necesario efectuar una selección de indicadores (Giuffré *et al.*, 2006).

La selección de indicadores para conformar un conjunto mínimo de datos (CMD) en diferentes ambientes y suelos, es muy recomendada (Qi *et al.*, 2009; Imaz *et al.*, 2010).

Si bien, la selección de un CMD, va en detrimento de la pérdida de información de los indicadores que no son elegidos, reduce la necesidad de determinar un gran número de variables, y evita problemas como la redundancia de información y un trabajo de laboratorio tedioso (Qi *et al.*; 2009; Rojas, 2012).

Los componentes de un CMD, no son universales y los adecuados para una evaluación indirecta, son aquellos determinados como críticos para los objetivos

de cada manejo (Andrews *et al.*, 2004) y deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio (Cantú *et al.*, 2007).

La aplicación de técnicas estadísticas multivariantes puede ser un primer paso para la evaluación de la CS, ya que proporcionan un medio objetivo de extraer información e identificar los parámetros de mayor peso y relevancia (Wander y Bollero, 1999; Giuffré *et al.*, 2006). Entre ellas, el análisis de componentes principales (ACP) fue utilizado por primera vez para identificar y agrupar situaciones bajo diferentes usos de la tierra por Schipper & Sparling (2000).

La cantidad y multidimensionalidad de las variables que intervienen en un agroecosistema (Villamil *et al.*, 2008) y dentro de éste, en el sistema suelo, hacen que determinar la CS, no sea un estudio sencillo. Por ello, resulta necesario que la complejidad y multidimensión de la CS, sean simplificadas en valores claros, objetivos y generales que sean obtenidos en base a la información brindada por los IC.

Parr *et al.*, 1994, señalaron que es conveniente identificar y cuantificar los IC de suelo, estableciendo valores críticos para las condiciones específicas de cada sitio, ya que varían ampliamente según el tipo de suelo, el régimen de humedad y la temperatura (Hevia *et al.*, 2003).

La selección de los límites críticos para los IC plantea varios problemas entre los que pueden mencionarse: i) las funciones del suelo pueden verse afectadas por varios parámetros simultáneamente; ii) un indicador como por ejemplo el carbono orgánico, afecta varias funciones del suelo y en consecuencia el valor crítico o el rango apropiado para un indicador puede variar según la función que se evalúa; iii) el límite crítico de un indicador se puede modificar (mejorar o empeorar) por los límites de otras propiedades del suelo y por las interacciones entre los indicadores (Arshad & Martin, 2002; Lupi, 2014).

Diversos autores como Wander & Bollero (1999), Giuffré *et al.* (2006), Shukla *et al.* (2006), Xu *et al.* (2006), Villamil *et al.* (2008), Romaniuk (2010) y Rojas (2012),

han efectuado trabajos en calidad de suelos en los que han aplicado técnicas de análisis multivariante como análisis de componentes principales, factor de análisis ó su combinación con un análisis discriminante, a los efectos de determinar cuáles son los indicadores de suelo que permiten discriminar mejor las distintas categorías de manejo de suelo o sistemas de cultivo.

Un enfoque para el desarrollo de un sistema de cuantificación de la calidad, es definir un suelo de referencia contra el cual el cambio de la calidad de los suelos puede ser comparado o cuantificado. Un suelo bajo la vegetación nativa clímax que ha sufrido o no una perturbación antropogénica mínima, puede ser utilizado como un suelo de referencia de alta calidad (Leirós *et al.*, 2000).

Existen indicadores simples e índices sintéticos, los primeros están constituidos por la combinación de dos o más datos, mientras que los índices son funciones matemáticas sintetizadoras (EEA, 2002) utilizadas para resumir información compleja sobre un fenómeno en estudio, con el objeto de detectar rápidamente cambios dentro de un sistema (Torres *et al.*, 2006).

El establecimiento de índices, es considerado de crucial importancia en la determinación del estado de degradación ó de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008).

Entre las técnicas más usadas se destacan la ponderación y transformación de los indicadores y su combinación dentro de un índice (Andrews *et al.*, 2002; Bastida *et al.*, 2006); la obtención de una variable sintética o combinación lineal de las variables originales que resume información, y es interpretada como un índice (Godshalk & Timothy, 1988; Almenara-Barrios *et al.*, 2002; Tusell, 2008; Santana Rodríguez *et al.*, 2010); ó la aplicación de regresiones lineales múltiples, donde una variable es calculada por la combinación lineal de otras (Trasar-Cepeda *et al.*, 1998; Zornoza *et al.*, 2008).

Una vez construido el índice, su efectividad y sensibilidad, deben ser validadas en suelos con y sin disturbio antrópico, donde un buen índice de calidad deberá

ser sensible a las perturbaciones y a las prácticas de manejo, dichas validaciones sólo han sido efectuadas por unos pocos autores como Burger & Kelting (1999) y Zornoza *et al.* (2008).

Cabe resaltar que gran parte de los investigadores que han trabajado en los últimos años en la construcción de índices, sostienen que los indicadores deben estar referidos a un objetivo determinado, el cual generalmente es la productividad. Sin embargo, luego de evaluar los resultados provistos por dichos índices, surge que, aunque la mayoría de ellos logra diferenciar gran parte de los tratamientos, la calidad global del suelo no queda representada equitativamente, tomando mayor importancia aquellos indicadores relacionados directamente con la disponibilidad de nutrientes, que en general correlacionan mejor con el rendimiento. Esta aproximación puede ser peligrosa en el largo plazo, ya que aspectos físicos o biológicos pueden quedar enmascarados al no verse seleccionados o representados adecuadamente dentro del índice (Romaniuk, 2010). En la caracterización de la CS, las propiedades biológicas han recibido menos énfasis que las propiedades químicas y físicas, ya que sus efectos son difíciles de medir, predecir o cuantificar (Parr *et al.*, 1992).

Mientras que algunos de los indicadores de calidad pueden ser muy sensibles a los cambios, otros pueden ser más sutiles; lo que se busca es medir y cuantificar los indicadores más sensibles y desarrollar con ellos Índices de calidad que se puedan utilizar de forma fiable para vigilar y predecir el impacto de los sistemas agrícolas y prácticas de manejo (Parr *et al.*, 1992). Asimismo los índices pueden proporcionar una indicación temprana de la degradación del suelo y la necesidad de medidas correctivas.

Por lo expuesto, en la presente tesis para la obtención de índices de calidad, se agruparon los atributos del suelo en 3 categorías (físicos, químicos y biológicos).

1.1.5 Estudios de calidad de suelo en Argentina

La deforestación, el sobrepastoreo, y la conversión de tierras vírgenes a la agricultura, han llevado a la disminución de la calidad física, química y biológica del suelo en todo el mundo derivando en problemas de erosión, pérdida de suelo y deterioro del ecosistema (Doran *et al.*, 1998), especialmente en aquellos más frágiles como los suelos subtropicales rojos (Dalurzo, 2002).

Nuestro país no es ajeno a la realidad mundial, ya que debido a la expansión de la frontera agraria se han eliminado centenares a millones de hectáreas de bosques, produciéndose uno de los procesos de deforestación más fuerte de su historia, y la consiguiente emisión de GEI a la atmósfera (Montenegro *et al.*, 2007). Muchos suelos agrícolas han sufrido pérdida de calidad, denotando disminuciones en los contenidos orgánicos y degradación como consecuencia del uso sostenido de prácticas de labranza convencional por más de una centuria (Álvarez, 2001, Aparicio & Costa, 2007).

Los bosques nativos se encuentran severamente degradados, y requieren ser manejados para favorecer su recuperación y presentarse como una alternativa viable del uso del suelo frente a la agricultura. La falta de ordenamiento territorial permite que la frontera agrícola continúe avanzando sobre el bosque pese a que existen grandes extensiones de tierras aptas para agricultura subutilizadas o abandonadas (Dirección de Bosques, 2007).

En el año 2002, en la provincia de Misiones, el área bajo selva subtropical ascendía a 1.224.000 has, de las cuales se deforestaron 62.412 has durante el período 2002-2006 según datos aportados por autores como Montenegro *et al.* (2007) y Bertolami *et al.* (2009). En tanto que Organizaciones no gubernamentales (ONG's), estimaron pérdidas de 250.000 has de selva en los últimos 20 años (Korol, 2009), siendo la tasa de deforestación provincial del orden del -1,33 %, superando la tasa de deforestación media de Argentina (-0.82 %) (Dirección de Bosques, 2007).

En la mencionada provincia, abundan las llamadas “tierras coloradas” o “suelos rojos”, que comprenden suelos ácidos de baja fertilidad y elevada susceptibilidad a la erosión, del orden de los Alfisoles, Oxisoles y Ultisoles (Peña Zubiate *et al.*, 1990).

Vigglizzo & Jobbágy (2010), evaluaron la expansión de la frontera agropecuaria y el cambio tecnológico en Argentina durante el período 1956-2005, y estimaron un incremento mayor al 60% del área asignada a cultivos anuales, señalando que la expansión de los cultivos de secano ocurrió mayoritariamente a expensas de las tierras de bosques (-18.4%), pastizales y pasturas (-6.8%). Determinaron el balance de carbono (C), y analizaron las variaciones en el stock de nitrógeno y fósforo en relación al stock de carbono, a partir de los cambios en el uso de la tierra. Concluyeron que la mayoría de las regiones presentaban pérdidas de C y que al estar el stock de N asociado al de C, toda pérdida de C en biomasa y en suelo, genera una pérdida proporcional de N.

Se han llevado a cabo investigaciones tendientes a estudiar la dinámica de la CS en tierras de cultivo comparando situaciones contrastantes como cultivos bajo labranza cero y cultivos bajo labranza convencional y/o situaciones prístinas tomadas como referencia (Giuffré *et al.*, 2006).

Albanesi (2001), estudió en el Chaco semiárido, el efecto del uso de la tierra sobre algunos parámetros de calidad biológica. Concluyó que el análisis de componentes principales y de conglomerados, permitió agrupar los sitios por su calidad biológica, que el efecto del uso está asociado a la topografía y que luego de 20 años de agricultura se registró pérdida de la calidad biológica, siendo las áreas bajas las menos afectadas por el cambio en el uso de las tierras.

Quiroga *et al.* (2001), efectuaron evaluaciones en suelos de la región semiárida pampeana (bajo manejos contrastantes), y su influencia sobre la MO total y sus fracciones, destacando las dificultades de considerar el contenido de MO total como un indicador de calidad en Molisoles de esa región. El estudio valida

regionalmente y resalta la conveniencia de considerar el contenido de MO joven o el índice MO/F (MO total/Fracción granulométrica < 100 µm), como indicadores más apropiados para evaluar la calidad de los suelos, destacando que las diferencias entre indicadores pueden resultar no tan importantes al considerar suelos degradados, donde la MO joven ha descendido a un mínimo y por ello no difiere de variaciones en los contenidos de MO total.

Dalurzo (2002), realizó estudios sobre el agregado de residuos orgánicos en suelos ferralíticos de Misiones, evaluando su efecto sobre variables que estiman sustentabilidad y concluyó que los indicadores de calidad más sensibles, fueron en superficie: materia orgánica particulada, espacio aéreo, y fósforo orgánico; de 10-20 cm: humedad equivalente, calcio y aluminio intercambiables, y de 20-30 cm: hidrógeno e índice de degradación, y que los mismos permitieron establecer el siguiente orden de calidad: selva > yerba con aserrín > yerba con cascarilla de Tung > yerba convencional.

Dalurzo *et al.* (2004, 2005, 2006), han efectuado estudios en suelos rojos de Misiones bajo distintos cultivos agrícolas, determinando como buenos indicadores de calidad a los atributos: macro y microporosidad, densidad aparente, estabilidad de los agregados, MO, nitrógeno total, MOP, fósforo orgánico, capacidad de intercambio efectiva y actividad de la fosfatasa ácida.

Giuffré *et al.* (2006), llevaron adelante una evaluación de indicadores de calidad físicos, físico-químicos, químicos y bioquímicos, en Argiudoles de la Pampa ondulada bajo situaciones de referencia (suelos vírgenes y pastizales) y bajo sistemas de labranza cero, aplicando análisis multivariado. Señalaron que los indicadores físicos mostraron ser sensibles para distinguir situaciones de labranza cero, los indicadores químicos como las fracciones de carbono, y los indicadores bioquímicos como la respiración fueron relevantes para distinguir las situaciones prístinas y pastizales de las parcelas cultivadas.

Quiroga *et al.* (2006), evaluaron en Haplustoles de la Pampa semiárida y subhúmeda, la relación MO/limo+arcilla como indicador de calidad de los rendimientos de granos de cebada, relacionada a la disponibilidad de nitrógeno y a las condiciones físicas para el desarrollo del cultivo. Concluyeron que la relación mencionada resultó un mejor predictor de los rendimientos que la disponibilidad de nutrientes y que la MO.

Noellemeyer *et al.* (2006), efectuaron estudios de calidad de suelo bajo uso pecuario en Haplustoles énticos de La Pampa bajo pastizales naturales, a partir de la determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos, estableciendo índices de estratificación de carbono, de estabilidad de agregados y relaciones como MOP/MO.

Lupi *et al.* (2007), evaluaron en Ultisoles de Misiones, el impacto de las prácticas de repoblación forestal con *Pinus* sp., sobre el carbono orgánico (CO), el carbono liviano (CL) y la estabilidad de los agregados. Señalaron que el sistema de repoblación forestal afecta la cantidad y calidad del carbono del suelo, las pérdidas de CL y CO estuvieron acompañadas por una degradación en las condiciones físicas del suelo (disminución acentuada en el diámetro medio ponderado de los agregados).

Aparicio & Costa (2007), llevaron a cabo un estudio en Argiudoles típicos de la Pampa Argentina, a fin de identificar indicadores de calidad físicos y químicos que resultaran sensibles a los cambios producidos en sistemas de cultivo continuos, señalando entre los más sensibles a la porosidad estructural y a la capacidad de intercambio catiónico.

González *et al.* (2007), efectuaron un trabajo en tres ecosistemas diferentes considerando Molisoles nativos y cultivados de Buenos Aires, Entisoles de Peccioli (Italia) y Alfisoles de Salamanca (España), y confirmaron la utilidad de las variables bioquímicas como indicadores potenciales de la degradación del suelo causadas por las prácticas culturales.

Cantú *et al.* (2007), efectuaron estudios en Hapludoles típicos, del SO de la provincia de Córdoba, bajo diferentes sistemas de uso y manejo a fin de desarrollar y aplicar a partir de propiedades físicas, químicas y físico-químicas, un set mínimo de indicadores para la evaluación de la CS, elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio.

Von Wallis *et al.* (2008), evaluaron el impacto de la quema sobre algunos parámetros químicos en suelos rojos de Misiones destinados a la forestación, encontraron un aumento del P disponible hasta los 30 cm de profundidad, sin variación en los elementos N, Ca, K.

Píccolo *et al.* (1998, 2004, 2008), estudiaron en Ultisoles de Misiones, la calidad de la materia orgánica y de sus fracciones en suelos bajo selva y yerba mate , y utilizando carbono marcado, y determinaron que cuando se realizó monocultivo de yerba mate por 50 años, el 91% del CO se encontró bajo formas estables, sin embargo no se evidenciaron diferencias en el aspecto físico (porosidad).

Ferreras *et al.* (2007; 2009), evaluaron la sensibilidad de una serie de parámetros físicos, químicos y bioquímicos en suelos representativos de la Región Pampeana (Argiudoles típicos y ácuicos), bajo diferentes manejos con la finalidad de establecer los parámetros que reflejaran de manera más sensible y temprana el grado de degradación o recuperación, comparando la información generada en las parcelas bajo cultivo, con suelos no perturbados, considerados como referencia. Concluyeron que el cultivo provocó una pérdida fundamentalmente del carbono asociado a los agregados >53 mm (MOP), como así también una menor actividad microbiana y enzimática, señalando dentro de los indicadores de fertilidad física más sensibles la estabilidad de agregados en agua y etanol.

Romaniuk (2010), efectuó una evaluación de la CS en sistemas extensivos (agrícola-ganadero) e intensivos (hortícola) de la provincia de Buenos Aires (Argiudoles típicos y vérticos). Obtuvo índices simples y complejos, concluyendo

que la cuantificación de la calidad mediante la elección de un reducido número de indicadores seleccionados adecuadamente, logró caracterizar a las situaciones analizadas de modo muy similar a la obtenida al considerar todos los grupos de variables juntos (físicas, químicas, bioquímicas y microbiológicas).

Ferrary Laguzzi *et al.* (2010), trabajaron en suelos de la provincia de Salta, bajo distintos sistemas de labranza (cero, mínima y convencional), efectuando el fraccionamiento de la MO del suelo. Señalaron que la fracción más gruesa de la MOP resultó un indicador más sensible a los cambios producidos por los distintos sistemas de labranzas.

Pérez Brandán *et al.* (2010), evaluaron en Inceptisoles de Salta, el efecto de diferentes sistemas de labranza sobre algunos parámetros biológicos (poblaciones nativas de actinomicetes, *Trichoderma* spp., *Gliocladium* spp., hongos totales, biomasa y respiración microbiana), indicando que resultaron bioindicadores eficientes para evaluar el efecto de las labranzas sobre la calidad del suelo.

Benintende *et al.* (2010), efectuaron la caracterización de cinco suelos de Entre Ríos pertenecientes a los órdenes Alfisoles, Vertisoles y Molisoles, utilizando indicadores biológicos y bioquímicos, resultando el carbono y el nitrógeno de la biomasa microbiana, y el nitrógeno mineralizado (incubación anaeróbica) los que mostraron las mayores diferencias entre los suelos estudiados.

Romaniuk *et al.*, (2011), efectuaron estudios de CS, en la provincia de Buenos Aires, en Argiudoles vérticos bajo sistemas intensivos, con uso hortícola convencional y orgánico, por medio de mediciones de la diversidad microbiana del suelo como indicadores de calidad, señalando que la biomasa microbiana fue menor, y los indicadores de stress fueron mayores en los sistemas bajo manejo convencional.

Ullé *et al.* (2011), trabajaron en suelos de la región pampeana, en establecimientos orgánicos agrícola-ganaderos, determinando variables físicas,

químicas y biológicas; señalando que las químicas (CO, N, Ca) fueron más sensibles que las variables biológicas en detectar los cambios ocurridos en la relación de MSP y MCP (distribución de meso y microporos).

Rojas (2012), realizó estudios sobre Indicadores de calidad en suelos desmontados y destinados a la producción agrícola, en un área piloto de la Ecorregión Chaqueña. Trabajó en Inceptisoles (Haplustept údico), con el objetivo de seleccionar las propiedades edáficas físicas y químicas, más sensibles para detectar cambios debido al uso, concluyendo que los atributos más sensibles fueron: densidad aparente, fracción erosionable, carbono orgánico total, carbono orgánico particulado y nitrógeno total, los cuales consideró, deberían ser incluidos en cualquier conjunto mínimo de datos (CMD) para esa región.

Mórtola (2013), evaluó en Ultisoles de Misiones, el impacto de diferentes sistemas de manejo de residuos forestales sobre el capital de nutrientes, principalmente sobre las formas de fósforo (P). Destacando que cuando se eliminaron los residuos, ya sea por extracción manual o por quema, se presentó un mayor efecto de adsorción de este nutriente por parte del suelo, en tanto que el mayor impacto negativo ocurrió sobre el P orgánico, P lábil y P moderadamente lábil.

Lupi (2014), efectuó estudios sobre el impacto del manejo forestal sobre la calidad de los suelos, editando una guía técnica con pautas para el monitoreo de disturbios del suelo ocasionados por el manejo forestal.

La mayoría de los trabajos sobre CS, fueron realizados en regiones de clima templado y enfocados en la determinación de indicadores que resultan sensibles a los cambios en el uso. Unos pocos trabajos, han tenido como objetivo la obtención de índices de calidad, y la mayor parte no han incluido la validación de los mismos, siendo escasos los estudios desarrollados en regiones de clima subtropical (Anexo, Fig.2).

En la provincia de Misiones, caracterizada por clima subtropical sin estación seca y suelos de escasa fertilidad y elevada susceptibilidad a la erosión, el avance de la frontera agraria hace necesario contar con información científica que brinde indicadores e índices efectivos y sensibles para cuantificar la calidad de los suelos, a fin de evaluar la sustentabilidad de los agro-ecosistemas.

Estudios efectuados por Laclau (1994), indican que gran parte de la flora y fauna de la provincia está amenazada, ya que más del 50% de la vegetación natural fue reemplazada para desarrollar actividades agropecuarias (plantaciones forestales de *Pinus* sp., *Araucaria*, *Eucalyptus*; ganadería; agricultura de yerba mate, té, tabaco, caña de azúcar, maíz) o modificada por el empobrecimiento de los bosques debido a la extracción de madera, la quema y la ganadería en los pastizales del sur de la provincia.

Choné *et al.*, (1991) indicaron que en suelos subtropicales rojos (Oxisoles) cuando la selva es eliminada por medio de la quema, lo que se afecta principalmente es la parte de biomasa que está sobre la tierra y una pequeña parte del carbono (C) en el suelo hasta una profundidad de 3 cm. La magnitud de las pérdidas posteriores, del C que queda en el suelo, dependen del tipo de uso del suelo que reemplace la cobertura forestal (FAO, 2002).

En la actualidad, el Centro Regional del INTA de Misiones, lleva adelante un Plan Tecnológico Regional 2009-2012, y destaca dentro de los principales problemas detectados, al manejo inadecuado y no sustentable del recurso suelo, especialmente en el caso de suelos dedicados a cultivos anuales (INTA, 2009).

A la fecha, no se han desarrollado índices que permitan diagnosticar la calidad y conocer su dinámica, como tampoco se cuenta con una metodología para la cuantificación de la calidad edáfica adaptada a los suelos ácidos, rojos, subtropicales.

La obtención de índices es primordial en el avance del estudio de la calidad de estos suelos ya que permitirá no solo realizar diagnósticos y determinar

problemáticas, sino también contribuir con herramientas para la toma de decisiones.

Para evaluar los efectos del cambio en el uso de las tierras, es necesario contar con mayor información y metodología científicas, que permitan la selección de indicadores sensibles a los cambios, y el desarrollo de índices de calidad de suelo, a fin de conocer el estado en que se encuentra el recurso y el impacto de los distintos sistemas de cultivo y prácticas agronómicas, con vistas a preservar su productividad y prevenir daños ambientales.

Los cambios en el uso, en la provincia de Misiones, generan la necesidad de investigar y cuantificar la intensidad y la dirección de los mismos y sus impactos sobre las funciones del suelo.

Resulta necesario contar con una metodología que permita cuantificar la calidad de los suelos rojos de Misiones, a partir del desarrollo y aplicación de índices que sean válidos y efectivos, a fin de evaluar cómo los sistemas de cultivo y las prácticas de manejo implementadas en la actualidad, afectan la capacidad de los suelos para sostener la producción de cultivos y la calidad ambiental.

1.2 HIPOTESIS

Las hipótesis fueron:

- El desarrollo y la aplicación de índices de calidad permitirá el diagnóstico de la calidad del suelo, el monitoreo de su dinámica y otorgará herramientas para la toma de decisiones a la hora de evaluar agro-ecosistemas en suelos rojos de Misiones.
- La materia orgánica particulada y la estabilidad de agregados resultan indicadores de calidad edáficos capaces de reflejar el estado de un agroecosistema con respecto a su sostenibilidad y su inclusión en índices de calidad posibilitará detectar rápidamente cambios debidos al uso de la tierra.

- El stock de carbono es un indicador de mejoramiento, sostenimiento o degradación del suelo, que al estar vinculado a la calidad del suelo y del aire, permitirá inferir si un sistema es o no más amigable con el ambiente que otro.

1.3 OBJETIVOS

El **objetivo general** fue generar los conocimientos necesarios para:

- ✚ Seleccionar indicadores y construir índices de calidad que permitan evaluar la calidad de suelos rojos y monitorear su dinámica.
- ✚ Validar los Índices a través de su efectividad y sensibilidad en distintos sistemas productivos.
- ✚ Establecer cuáles sistemas de cultivo resultan más adecuados para desarrollar una producción sustentable.

Los **objetivos específicos** fueron:

- Identificar indicadores de calidad edáficos y determinar cuáles resultan necesarios para la construcción de índices de calidad.
- Evaluar cada indicador en particular, y la combinación de indicadores de calidad, estableciendo los cambios que se producen por el uso del suelo.
- Construir índices de calidad de suelo aplicando modelos matemáticos y análisis estadístico multivariado.
- Determinar el stock de carbono en los distintos sistemas de cultivo y evaluar los cambios producidos por efecto del uso del suelo.
- Evaluar cambios en el uso de las tierras determinando si los suelos bajo los distintos sistemas se encuentran en vías de mejoramiento, sostenimiento o degradación.

CAPÍTULO 2: ÁREA BAJO ESTUDIO, DISEÑO EXPERIMENTAL, MUESTREO, VARIABLES ÉDAFICAS

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL AREA BAJO ESTUDIO

2.1.1 Ubicación geográfica y clima

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Misiones, ubicada al NE de la República Argentina, entre los paralelos 25° 28' y 28° 10' de Latitud Sur y los meridianos 53° 38' y 56° 03' de Longitud Oeste (Anexo, Fig. 1).

La provincia abarca una superficie aproximada de 2,9 millones de hectáreas y presenta una población rural cercana a los 300.000 habitantes (INTA, 2009). Se ubica en una región de clima subtropical sin estación seca marcada (Anexo, Fig. 2), correspondiendo al tipo climático "Cfa" en el Sistema de clasificación climática Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007). La temperatura media anual oscila entre 20,5 y 21,5°C, la precipitación media anual es de 1300 a 1500mm y la evapotranspiración potencial media anual de 1050 a 1100mm. El régimen de lluvias es del tipo torrencial, con intensidades que pueden alcanzar frecuentemente de 25 a 50 mm.h⁻¹ y con máximos de 75 mm.h⁻¹. Debido a estas características, las lluvias son capaces de provocar serias pérdidas de suelo y constituyen una permanente amenaza a la estabilidad e integridad física de algunos tipos de suelos (Godagnone *et al.*, 1988).

2.1.2 Región Ecológica

Se encuentra comprendida dentro de la Ecorregión "Selva Paranaense" (Anexo, Fig. 3), y ubicada sobre la parte sur del Macizo de Brasil, que fuera recubierto por capas sucesivas de rocas eruptivas, donde por efecto erosivo del agua y del viento, se formó una planicie o meseta basáltica. La misma, se presenta como una columna vertebral en dirección Noreste-Suroeste, dividiendo los ríos Paraná y Uruguay (Rodríguez & Silva, 2012).

2.1.3 Vegetación

Desde el punto de vista tanto de la flora como de la fauna, es probablemente en su ambiente natural, la formación de mayor riqueza de la Argentina (Cabrera, 1971). En ella se mezclan y alternan selvas higrófilas, bosques xerófilos, esteros, y lagunas. El tipo de vegetación natural predominante es la selva, caracterizada por la abundancia de árboles de gran porte, y de lianas y epífitas características de zonas tropicales húmedas. Se pueden diferenciar tres estratos arbóreos, un estrato de Bambúseas, un estrato herbáceo y un estrato muscinal (Cabrera, 1971).

2.1.4 Morfología, Geología y Suelos

La planicie discontinua presenta relieve ondulado con lomas de pendientes medias del 5 al 9% (Sanesi, 1965). Se observan en ella discontinuidades por fallas, circunstancia que define un escalonamiento, con altitudes crecientes de sudoeste a nordeste, desde 300 m s.n.m. en L.N. Alem, a 850 m s.n.m. en Bernardo de Irigoyen (SAGyP, e INTA, 1990).

La mayor parte del territorio está dominado por la presencia de lateritas, y se ubica sobre uno de los más grandes reservorios de agua dulce subterránea, el acuífero Guaraní (Rodríguez & Silva, 2012).

Las rocas muestran un fuerte empobrecimiento en el contenido de óxido de silicio (SiO_2), el cual es más marcado mientras más aumenta el tenor de óxidos de hierro y aluminio (Fe_2O_3 y Al_2O_3). Este tipo de alteración lleva a la formación de caolinita e hidrólisis del hierro y aluminio, siendo ésta la arcilla dominante (Sanesi, 1965).

Abundan los suelos ácidos, altamente meteorizados, denominados comúnmente “tierras coloradas” ó “suelos rojos” que representan el 33,7% de la superficie provincial. Dentro de este grupo, desde el punto de vista taxonómico, predominan los Ultisoles, Alfisoles, y Oxisoles. La aptitud de los

suelos para su uso, está condicionada por factores como baja fertilidad, alta acidez y susceptibilidad a la erosión hídrica (Peña Zubiate *et al.*, 1990).

En base al sistema del Soil Taxonomy, los suelos bajo estudio se clasificaron como: Oxisoles (Anexo, Tabla I), en los cuales los procesos pedogenéticos más importantes que han tenido lugar durante su evolución son: desilificación y concentración de hierro libre y en algunos casos de gibsita junto a la desaparición casi total de los minerales fácilmente intemperizables, de los minerales arcillosos 2:1 y el lavado casi completo de los nutrientes. Presentaron un horizonte B óxico con material muy intemperizado, con presencia de materiales arcillosos presumiblemente caolínico o haloisítico, de baja capacidad de intercambio total ($<16 \text{ cmol kg}^{-1}$) (Anexo, Tabla II). El horizonte óxico, presentó escasos cutanes de arcilla en el B2, con límites graduales. En cuanto al color, presentaron matices más rojos que 2,5 YR y cromas en húmedo <3 .

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL, MUESTREO DE SUELOS Y VARIABLES EDÁFICAS

El trabajo se realizó en dos etapas (Etapas I y II), en Oxisoles bajo sistemas naturales (selva subtropical) y cultivados, de los Departamentos de Alem, Oberá, Cainguás y Guaraní (Etapa I) y del Departamento de Oberá (Etapa II) (Fig. 2.1).

El abordaje metodológico se realizó definiendo un nivel de referencia contra el cual se compararon y cuantificaron los cambios de CS. Suelos con vegetación clímax (selva subtropical) fueron tomados como escenario de referencia de alta CS, con respecto al cual se compararon los cambios en la calidad por efecto del uso del suelo.

La selva subtropical tomada como referencia, se caracteriza por la abundancia de árboles de gran porte, entre los que se pueden encontrar: Guatambú, (*Balfourodendron riedelianum*); Lapacho rosado, (*Tabebuia ipé*), Peteribí, (*Cordia*

trichótoma); Timbó u oreja de negro, (*Enterolobium contortisiliquum*); Laurel, (*Nectandra lanceolata*); Grapia, (*Apuleia leiocarpa*); Ambay, (*Cecropia pachystachya*), como así también por la presencia de un gran número de arbustos, lianas, epífitas y bambúseas entre las que se destaca la tacuara guazú (*Guada angustifolia*), Cabrera (1971).

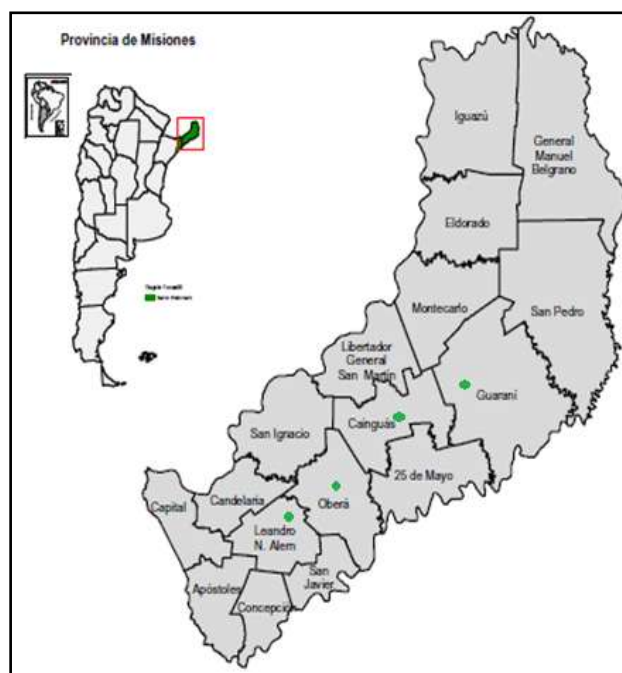


Figura 2.1: Ubicación de los Departamentos Leandro Alem, Oberá, Caingua y Guaraní (Misiones).

Los cuatro departamentos mencionados, se encuentran dentro de la zona agroecológica “de Monte” (Fig. 2.2), la cual abarca el 93 % de la superficie de la provincia, y corresponde a la Eco-Región del Bosque Paranaense, originalmente, cubierta por selvas subtropicales y con mayores contenidos de materia orgánica que la región “de campo” (INTA, 2009).

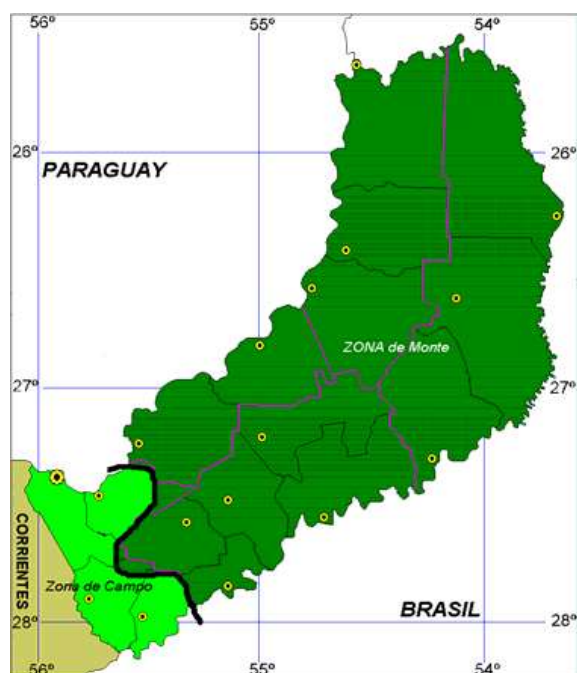


Figura 2.2: Zonas Agro-Ecológicas (ZAE) de la Provincia de Misiones (Fuente: INTA, 2009).

Desde el punto de vista de la producción y de las explotaciones, la zona bajo estudio abarca dos de las cinco Zonas Agro-Económicas Homogéneas (Fig.2.3):

- La zona 3 ó “Noreste”, que comprende el 31% de las explotaciones agrícolas de la provincia, en la cual predominan los cultivos anuales en manos de pequeños productores y mano de obra familiar.
- La zona 4 ó “Centro”, que comprende el 42% de las explotaciones agrícolas, con predominio de pequeños productores capitalizados y presencia de una rica diversidad de industrias de transformación de la materia prima agropecuaria.



Figura 2.3: Zonas Agroeconómicas Homogéneas (ZAH) de la Provincia de Misiones (Fuente: INTA, 2009).

En ambas zonas, podemos encontrar cultivos como yerba mate (*Ilex paraguariensis*), té (*Camelia sinensis*), citrus (principalmente mandarina) y, forestal (mayoritariamente coníferas del género *Pinus*), tabaco (*Nicotiana tabacum*), y cultivos de subsistencia: mandioca (*Manihot Esculenta*) y maíz (*Zea mays*) para autoconsumo y actividades de ganadería.

Las principales industrias son la yerbatera, tealera, azucarera, maderera (aserraderos), acopio y clasificación de tabaco; como así también plantas de empaque y de jugos cítricos concentrados (INTA, 2009); siendo la Provincia de Misiones, la principal productora de té, yerba mate y tabaco de nuestro país.

En la producción tealera, un 67% de las plantaciones de té son menores a 5 has, con más de 30 años, reciben fertilizaciones periódicas (principalmente nitrogenadas) y esta producción es destinada principalmente al consumo externo (92 % para exportación).

Respecto a la producción yerbatera, los lotes tienen un tamaño promedio de 10,6 has, más de 20 años y el 87% de la producción está destinada al consumo interno.

La producción tabacalera, se caracteriza porque un 93% corresponde a tabaco tipo “Burley”, los productores son minifundistas con lotes de 1,6 has promedio, con dependencia tecnológica y financiera de empresas y/o de Cooperativas tabacaleras (INTA, 2009).

2.2.1 Para la obtención de indicadores, el desarrollo y la aplicación de índices de calidad

En la etapa I, se tuvo por finalidad la obtención de un set o conjunto mínimo de datos (CMD) integrado por indicadores de calidad, sensibles a los cambios debidos al uso del suelo, y la evaluación de sus interrelaciones (Cap. 3), el desarrollo de índices de calidad (Cap. 4), y la aplicación de formulaciones preexistentes para evaluar calidad de suelo como el stock de carbono y las relaciones entre parámetros químicos y biológicos vinculados a la materia orgánica (Cap. 6).

El set de datos correspondientes a los parámetros evaluados en esta etapa, fueron oportunamente relevados por el grupo de investigación de la Cátedra de Edafología (FCA-UNNE), durante la ejecución del Proyecto “Dinámica del fósforo en Oxisoles bajo distintos sistemas de uso”. El estudio se llevó a cabo mediante un diseño en bloques completos al azar. Se seleccionaron 4 departamentos: Alem, Oberá, Cainguás y Guaraní y cada departamento fue considerado como un bloque. Cada tratamiento estuvo constituido por tres parcelas de 15 x 50 m y en cada una, el muestreo fue aleatorio simple, contemplando la variabilidad dentro de cada tratamiento, y efectuado a 3 profundidades: 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m.

El tratamiento Sv, correspondió a selva subtropical sin disturbio antrópico (nivel de referencia), caracterizada por la abundancia de árboles de gran porte, arbustos, lianas, epífitas y Bambúseas.

Los tratamientos bajo uso agrícola correspondieron a lotes de productores con similares características de producción de yerba mate (Yc), mandarina (Ci) y tabaco (Ta).

El tratamiento Yc, correspondió a lotes de productores bajo cultivo de yerba mate, *Ilex paraguariensis* Hill, de 15 a 20 años de edad, con una densidad promedio de 2200 plantas.ha⁻¹, bajo manejo convencional con control mecánico de malezas, con azada manual en las líneas y rastras de discos en las interlíneas, sin uso de enmiendas cálcicas, ni fertilizantes.

El tratamiento Ci, correspondió a lotes cultivados con mandarina Satsuma variedad Okitsu (*Citrus unshiu* Marc.), de 8 a 10 años de edad, en lotes con veinte años de cultivos de escarda previos. La densidad fue de 660 plantas ha⁻¹, con aplicaciones de enmiendas cálcicas y fertilizantes (114 kg de N; 55 kg de P; 128 kg de K y 35 kg de Ca ha⁻¹ año⁻¹). Los controles de malezas se realizaron con desmalezadoras de eje vertical en las interlíneas y con aplicaciones de herbicidas en las líneas del cultivo.

El tratamiento Ta, correspondió a lotes cultivados con tabaco (*Nicotiana tabacum* L.), tipo “Burley”, con una densidad promedio de 30000 plantas.ha⁻¹, bajo labranza convencional, con control mecánico de malezas mediante el uso de cultivadores, aplicaciones de enmiendas cálcicas y de fertilizantes fosfatados con dosis anuales medias de 55 kg de P por hectárea.

Las variables que integraron el set de datos fueron: densidad aparente (Da), densidad real (Dr), textura, pH, carbono orgánico (CO), fósforo asimilable (P), nitrógeno total (N), nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm), actividad de la fosfatasa ácida (Enz), materia orgánica particulada (MOP), capacidad de intercambio catiónico (T), cationes intercambiables como calcio (Ca), magnesio

(Mg) y potasio (K), hidrógeno y aluminio intercambiables (H y Al), resistencia a la penetración (RP), estabilidad de agregados (EA), humedad equivalente (HE), infiltración básica (Ib), y respiración de suelo (Res). Por cálculo se obtuvieron: porosidad total (PT), porosidad capilar (Pc) y espacio aéreo (Eae).

2.2.2 Para la validación de los índices de calidad desarrollados

La etapa II tuvo por finalidad la validación de la efectividad y sensibilidad de los índices de calidad desarrollados en la etapa I y se llevó a cabo en Oxisoles del Departamento de Oberá (27°22'S, 54°58'W) bajo sistemas naturales y cultivados.

Para la validación de los índices desarrollados, se aplicaron las formulaciones matemáticas obtenidas para cada índice, a datos provenientes de Oxisoles bajo sistemas naturales y cultivados del Departamento de Oberá (Etapa II), siguiendo lo propuesto por Boote *et al.* (1996) y en base a los residuales aplicando la metodología propuesta por Zornoza *et al.* (2008)(Cap. 5). Se empleó un diseño completamente al azar, compuesto por cuatro tratamientos: selva (S), cultivo de maíz (*Zea mays* L.) (M), cultivo de té (*Camellia sinensis* L.) (T) y forestal con *Pinus* sp. (Pi), con 12 parcelas (10 x 50 m) por tratamiento y 3 profundidades de muestreo: 0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m.

El tratamiento S correspondió a lotes de selvas prístinas correspondientes a reservas naturales públicas y privadas de Oberá, sin disturbios antrópicos.

El tratamiento M, correspondió a lotes de pequeños productores (1 a 3,5 has) con 5 a 7 años de monocultivo de maíz bajo labranza convencional, con 20 años previos de uso agrícola continuo con alternancia de cultivos anuales como maíz, tabaco, y mandioca, uso de arado de disco, control mecánico de malezas, cosecha manual, y sin aporte de enmiendas orgánicas ni fertilizaciones.

El tratamiento T, correspondió a lotes de productores con cultivo de té de 40 a 60 años de edad, con fertilizaciones anuales de N (Urea 150-200 kg ha⁻¹año), y

sin agregado de enmiendas orgánicas, con cosecha mecánica (4 ó 5 cortes por año).

El tratamiento Pi, correspondió a lotes bajo uso forestal, implantados con *Pinus* sp. de 20 años de edad, bajo manejo convencional de la zona, con una densidad promedio de árboles de $1100.ha^{-1}$.

El muestreo de suelos consistió en la toma de tres muestras compuestas por lote a tres profundidades (0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m), completándose 144 muestras en la etapa I y 144 muestras en la etapa II.

Las variables que se determinaron fueron aquellas necesarias para el cálculo de los índices de calidad desarrollados, dentro de las cuales se encontraron: densidad aparente (Da), estabilidad de agregados (EA), espacio aéreo (Eae), infiltración básica (Ib), humedad equivalente (HE), resistencia a la penetración (RP), carbono orgánico (CO), Nitrógeno total (N), Calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) hidrógeno (H) y aluminio (Al) intercambiables, materia orgánica particulada total (MOP), materia orgánica fracción gruesa (MOPa) y fina (MOPb), nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm), actividad de la enzima fosfatasa ácida (Enz) y respiración de suelo (Res).

2.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES EDÁFICAS

2.3.1 Acondicionamiento de las muestras de suelo: para su acondicionamiento se procedió a quitar las piedras, los elementos groseros y extraños, y se desmenuzaron los terrones de suelo. Las muestras se secaron al aire, dejándolas hasta adquirir equilibrio con la humedad ambiente. Se tamizaron por malla de 2 mm (Tamiz nº 10) para obtener la fracción de “tierra fina”, y una parte por tamiz de 0,5 mm (Tamiz N°35) para la posterior determinación de N total y CO.

Parámetros físicos:

2.3.2 Densidad aparente (Da): a partir de la extracción de muestras inalteradas por el método del cilindro (Forsythe, 1975). En cada lote bajo estudio, se

extrajeron 3 muestras simples para cada una de las profundidades consideradas, manteniendo intacta la estructura del suelo utilizando cilindros de Kopecki. Las muestras se llevaron a estufa 105°C hasta peso constante, y se pesaron obteniendo el peso seco. Para su cálculo, se aplicó la ecuación 1:

$$Da = \frac{\text{Peso del suelo seco a estufa (g)}}{\text{Volumen del cilindro (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

2.3.3 Densidad de partículas: por el Método del Picnómetro con empleo de vacío (Blake & Hartge, 1986; Montenegro González *et al.*, 1990). Se pesó suelo seco al aire (± 15 g), se colocó en un matraz de 50 ml y se agregó agua hasta cubrirlo, haciendo luego vacío durante 2 a 3 h, hasta el cese de burbujeo. Se lo enrasó y pesó. Teniendo en cuenta la tara del matraz, su volumen, los gramos de suelo usados y el factor de corrección de humedad de la muestra, se procedió a su cálculo.

2.3.4 Textura: por el método hidrométrico de Bouyoucos, basado en la Ley de Stokes (Dewis & Freitas, 1970). Se pesaron 50 g de suelo seco al aire, se efectuó la destrucción de la materia orgánica mediante el agregado de H₂O₂ (peróxido de hidrógeno) de 100 volúmenes, y aplicando calor (85° C) en baño maría. Luego se realizó una dispersión, química con NaOH 1 N y mecánica con dispersor (15 minutos). Se transvasó a una probeta y con el densímetro ó hidrómetro de Bouyoucos, previamente calibrado, se tomaron las lecturas a los 40 segundos (limo+arcilla) y a los 120 minutos (arcilla), efectuando el cálculo de los porcentajes de arena, limo y arcilla con las correcciones de las lecturas por temperatura correspondientes.

2.3.5 Humedad equivalente (HE): se determinó por el método de la centrífuga (Montenegro González *et al.*, 1990), colocando 1 cm de suelo en una celdilla de centrífuga, saturando la muestra por capilaridad durante 24 h. A posteriori se dejó drenar el exceso de agua y se sometió la muestra a centrifugado (2440 rpm, equivalente a 1000 veces la fuerza de la gravedad) durante 30 minutos,

secándola luego a 105º C hasta peso constante. La determinación de humedad se hizo por gravimetría.

2.3.6 Estabilidad de agregados (EA): por el método de Kemper y Rosenau (1986). El suelo seco al aire, se tamizó por mallas Nº 6 y 10, y se recolectaron los agregados contenidos entre ambos tamices (diámetro entre 2 y 3,36 mm). Se retiraron partículas groseras como cascotes, palitos, etc. que no componen los agregados del suelo. Se efectuó un tamizado en húmedo donde los agregados fueron sometidos a la acción disruptiva del agua utilizando la máquina de tamizar por ellos descrita. Para la determinación se trabajó con agregados de 2 a 3,36 mm humedecidos previamente por capilaridad empleándose filtros con malla de abertura de 0,5 mm. La longitud del desplazamiento de los tamices fue de 13 mm, con una frecuencia de 35 ciclos por minuto. El recorrido del desplazamiento de éstos se realizó siempre dentro del agua. El tiempo de tamizado para estos suelos de buena agregación fue de 30 minutos posteriormente para aumentar la acción de las fuerzas disruptivas y detectar mayores diferencias entre tratamientos. Los agregados que soportaron el tamizado fueron secados a 105ºC, pesados y corregidos por su contenido de arena y humedad.

Por cálculo se obtuvieron:

2.3.7 Espacio aéreo (Eae): a partir de los datos de densidad aparente y de partículas, aplicando la ecuación 2.

$$Eae (\%) = 100 - \left[(HE \times Da) + \frac{100 \times Da}{Dr} \right] \quad (2)$$

Donde: Dr : densidad real ó de partículas; Da : densidad aparente; HE : humedad equivalente.

2.3.8 Porosidad capilar (Pc): la estimación de microporosidad se obtuvo sobre la base de la humedad equivalente y la densidad aparente (Ecuación 3).

$$Pc = HE \times Da \quad (3)$$

2.3.9 Porosidad total (PT): en base a los datos de densidad aparente (D_a) y real (D_r), (Ecuación 4).

$$PT = \frac{D_r - D_a}{D_r} \quad (4)$$

Determinaciones a campo:

2.3.10 Infiltración básica (Ib): por el método del anillo simple (Lowery *et al.*, 1996). El método original registra el tiempo de entrada de las 2 primeras pulgadas de agua. Debido a la rápida infiltración de estos suelos, a fin de detectar diferencias entre tratamientos (Dalurzo, 2002), se aplicó la fórmula de Kostiakov (Fernández *et al.*, 1971). Las lecturas de lámina de agua ingresada se tomó cada 1 minuto, durante los primeros 5 minutos, y luego cada 5 minutos hasta que la entrada de agua al suelo por unidad de tiempo, se hizo constante.

2.3.11 Resistencia a la penetración: mediante un penetrómetro de cono (Bradford, 1986). Las mediciones se realizaron con contenidos de humedad a capacidad de campo, mediante el uso de un penetrómetro de impacto, con un pilón de 2 kg, cayendo de una altura de 0,50 m. El cono fue de 20 mm de altura y 16 mm de diámetro.

Parámetros químicos:

Siguiendo la metodología empleada por Wander & Bollero (1999), las variables pH y capacidad de intercambio catiónico, si bien son físico-químicas, fueron incluidas dentro de la categoría de propiedades químicas.

2.3.12 pH: determinado potenciométricamente en solución salina (KCl 0,1 M), en relación suelo-líquido 1:2,5 y con un período de equilibrio de 30 minutos. (Jackson, 1970)

2.3.13 Carbono orgánico (CO): por el Método de Walkley & Black modificado. (Nelson & Sommers, 1996). Se pesaron 0,15 g de suelo previamente tamizado (malla 0,5 mm, Tamiz Nº 35). Se efectuó la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio 1 N y ácido sulfúrico concentrado, valorándose por

retroceso con sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hasta color verde brillante. Para evitar interferencias propias de los suelos rojos se empleó ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85% y difenil para-sulfonato de bario. El contenido de materia orgánica se calculó asumiendo que un 58% está compuesta por carbono orgánico.

2.3.14 Nitrógeno total (N): se utilizó el método semi-microkjeldahl (Bremmer & Mulvaney, 1982). Para la microdigestión, se pesaron en tubos de ensayo, 0,1 g de suelo tamizado (malla 0,5 mm, Tamiz Nº 35). Se agregó 0,35 g de mezcla catalítica y 1 ml de H_2SO_4 , y se llevó a una temperatura de 350° C, hasta que la suspensión se clarificó, y se diluyó con agua destilada a 20 ml. A posteriori, en un balón Kjeldahl se tomó una alícuota de la suspensión, y se efectuó una destilación por arrastre de vapor, empleando un equipo de destilación y 5 ml de NaOH 10 N. Se recogieron aproximadamente 30 ml del destilado en 5 ml de una solución indicadora (ácido bórico). Se tituló el destilado con H_2SO_4 (0,01N) hasta que el color verde viró a rosado. El porcentaje de N se obtuvo por cálculo, considerando la diferencia entre los ml gastados de H_2SO_4 en la muestra y los gastados en el blanco.

2.3.15 Fósforo disponible (P): por el método de Bray & Kurtz II (Dewis & Freitas, 1970). Se pesó 3 g de suelo y se agregó 21 ml de solución extractora de fluoruro de amonio (NH_4F) 0,03 N y ácido clorhídrico (HCl) 0,1 N, separando el fósforo “adsorbido” y el “soluble en ácido”. El tiempo de agitación fue de 40 segundos y se filtró a través de papel de filtro Whatman Nº 42. El P en la solución fue determinado por el método de Murphy & Riley (1996), para lo cual se tomaron 5 ml del extracto en matraces de 50 ml, 8 ml de ácido ascórbico, y se enrasó con agua destilada. Las lecturas se hicieron con fotocolorímetro, luego de 10 minutos, con una absorbancia en 880 nm. Se realizó una curva estándar para determinar la concentración de P en solución expresada en mg kg^{-1} . Luego por cálculo se pasó el P obtenido en la solución a mg kg^{-1} suelo.

2.3.16 Capacidad de intercambio catiónica efectiva: por el método del cloruro de sodio N (Dewis & Freitas, 1970). Se pesaron 10 g de suelo en un tubo de centrífuga de 250 ml. Se agregaron 50 ml de NaCl N, agitándose durante 15 minutos. Luego, se centrifugó durante 5 minutos, y se filtró. Esta operación se repitió cuatro veces más hasta alcanzar un volumen aproximado de 250 ml. En el extracto obtenido se determinaron calcio, magnesio, potasio, aluminio y acidez intercambiables.

2.3.17 Calcio (Ca), magnesio (Mg), y potasio (K) intercambiables:

A partir de filtrado obtenido para capacidad de intercambio catiónico se determinaron calcio y magnesio, por complejometría con ácido etilén diamino tetracético (EDTA), y potasio por fotometría de llama (Dewis & Freitas, 1970).

Para el **calcio**, se tomó una alícuota de 5 ml, se empleó una solución reguladora de hidróxido de sodio (NaOH), cloruro de hidroxilamina, y unas gotas del indicador calcón. La titulación se efectuó con EDTA 0,02 N (sal disódica del etilén diamino tetracético) hasta obtener color azul.

Para el **magnesio**, se tomó una alícuota de 5 ml, se empleó como solución reguladora una mezcla de cloruro de amonio (NH_4Cl) y amoníaco (NH_3), gotas de trietanolamina y cloruro de hidroxilamina para eliminar interferencias. Como indicador se usó negro de eriocromo T, titulándose con EDTA 0,02 N, hasta que el color viró de rojo vino al azul.

Para **potasio**, se tomó una alícuota del filtrado y se leyó en el fotómetro de llama, calibrando con agua destilada para una lectura igual a 0 y con una solución de KCl 0,0005, para una lectura de 10.

2.3.18 Acidez (H) y aluminio intercambiables: se determinaron por titulación. (Jackson, 1970).

Para la **acidez**, se tomó una alícuota de 50 ml del extracto de NaCl obtenido para capacidad de intercambio, se tituló con hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N

estandarizado y fenolftaleína como indicador, con alternación de agitación y reposo, hasta que viró al color rosado.

Para **aluminio**, se tomó una alícuota de 50 ml del extracto de NaCl, se utilizó ácido clorhídrico (HCl) 0,1 N y fluoruro de sodio (NaF) al 4%, y se tituló con HCl 0,1 N estandarizado. El punto final fue cuando la solución quedó incolora.

Parámetros biológicos:

Siguiendo la metodología empleada por Wander & Bollero (1999), se incluyeron dentro de este grupo la materia orgánica particulada y el nitrógeno potencialmente mineralizable.

2.3.19 Materia orgánica particulada (MOP): se efectuó el fraccionamiento físico de Cambardella *et al.* (1999), utilizando tamices de 500 y 53 μm , separando así dos fracciones: una particulada gruesa de 2 a 0,5 mm (MOPa) y una particulada fina de 0,5 a 0,053 mm (MOPb), luego se aplicó el procedimiento de pérdida por ignición, detallado por Schulte (1988). A 30 g de suelo seco al aire, se lo dispersó con 90 ml de hexametáfosfato de sodio (5g L^{-1}) y se agitó durante 16 h, pasándolo a través de tamices de 500 y 53 μm con agua destilada para separar las dos fracciones. Cada fracción fue transferida a pesafiltros de acero inoxidable, secada y pesada. Luego se la sometió a 450°C durante 4 h y se pesó nuevamente para calcular luego por diferencia la MOP.

2.3.20 Nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm): por incubación anaeróbica (Waring & Bremner modificado por Keeney & Nelson, 1982). Se pesó 5 g de suelo, se agregó 15 ml de agua destilada y se efectuó una incubación anaeróbica por 7 días a 40°C . El N-NH_4^{+} liberado durante la incubación, fue determinado por micro-destilación por arrastre con vapor. Se determinó N en muestras sin incubar y por diferencia se obtuvo el Npm.

2.3.21 Actividad enzimática de la fosfatasa ácida, (Enz): se empleó el método propuesto por Tabatabai (1982). Se realizó una incubación de muestras de suelo durante 1 hora a 37°C , con una solución buffer (pH: 6,5) de sodio p-nitrofenil

fosfato (sustrato) y tolueno. Se determinó el p-nitrofenol liberado por la actividad enzimática, mediante método colorimétrico, efectuando la lectura con espectrofotómetro a 410 nm. La actividad enzimática fue expresada en mg de p-nitrofenol liberado por kg de suelo seco.

Determinación a campo:

2.3.22 Respiración de suelo (Res): fue determinada por acumulación del CO₂ en una cámara, aplicando el método propuesto por Sarrantonio *et al.* (1996). Se evaluó el flujo de dióxido de carbono del suelo (CO₂), con contenidos de humedad a capacidad de campo, en cámaras cerradas de PVC de 865,5 cm³. Se tomaron 100 cm³ de aire con la ayuda de una jeringa y aguja y se detectó el CO₂, empleando tubos Draeger (tubos de adsorción de dióxido de carbono), cuya seguridad es comparable con el método de cromatografía gaseosa (Parkin *et al.*, 1996), registrándose los cambios en la concentración del gas en la cavidad de la cámara en un tiempo reducido (30 minutos).

Por cálculo se obtuvieron:

2.3.23 Stock de carbono (SC)

Su cálculo se efectuó para los primeros 0,30 m de profundidad, sobre la base de diferentes formulaciones, a fin de seleccionar la más adecuada para los suelos y condiciones bajo estudio:

▪ En base a una profundidad fija (FD):

Se aplicó la ecuación utilizada por Ussiri *et al.* (2006), expresando el SC como la masa de carbono por unidad de área (Mg.ha⁻¹) aplicando la ecuación 5:

$$\text{Mg C ha}^{-1} = C \times Da \times e \times \frac{10^4 \text{ m}^2}{10^3 \text{ ha}} \quad (5)$$

Donde C es la concentración de carbono (Kg C Mg⁻¹), Da: densidad aparente (Mg m⁻³), y e: espesor de suelo considerado.

▪ **En base a una masa fija de suelo de 2500 Mg (MF2500):**

Los contenidos de C fueron transformados en valores de stock utilizando la ecuación 6:

$$\text{Mg C ha}^{-1} = C \times e \times Da \quad (6)$$

Donde C es contenido de carbono en %, e es el espesor de suelo considerado en cm, Da la densidad aparente en Mg. m^{-3} , ajustando luego el cálculo del stock de C a una masa de 2500 Mg de suelo ha^{-1} (Andriulo *et al.*, 2008).

▪ **En base a una profundidad equivalente (ESL):**

En este caso, para calcular el SC, fue calculada la profundidad de los suelos cultivados que contiene igual masa de suelo que los suelos prístinos (selva subtropical). Para lo cual se aplicó la ecuación (7) propuesta por Solomon *et al.* (2002):

$$\text{Profundidad corregida} = \frac{Da_{\text{suelo bajo selva}}}{Da_{\text{suelo cultivado}}} \quad (7)$$

Asumiendo que la densidad aparente (Da) de los suelos cultivados fue originalmente, igual a la correspondiente a los suelos prístinos (Solomon *et al.*, 2002).

▪ **En base a una masa equivalente de suelo (ESM):**

En este caso se aplicó para el cálculo del SC la ecuación (8) utilizada por Sisti *et al.* (2004):

$$Cs = \sum_{i=1}^{n-1} Cti + [Mtn - (\sum_{i=1}^n Mti - \sum_{i=1}^n MSi)] Ctn. \quad (8)$$

Donde:

Cs: es el carbono corregido por masa de suelo; Cti: carbono total en Mg ha^{-1} , calculado para cada profundidad i. Siendo $i=n-1$ la anteúltima profundidad.

Mtn: masa total de suelo en la última profundidad en el tratamiento considerado; Mti: masa total de suelo calculada para cada profundidad i, en el tratamiento considerado; MSi: masa total de suelo calculada para cada profundidad i, en la situación de referencia (selva); Ctn: carbono total en la

última profundidad correspondiente al tratamiento considerado, expresando en mg kg^{-1} .

▪ **En base a un sistema coordinado de masas acumuladas (CMC), propuesto por Gifford & Roderick, 2003:**

Este método gráfico, calcula el SC multiplicando la fracción de C por la masa seca de suelo en cada espesor de suelo considerado (g C g^{-1} suelo seco), graficando en coordenadas el C acumulado y la masa de suelo seco, efectuando luego interpolaciones. Para este estudio, las mismas fueron efectuadas considerando una masa de suelo seco por m^{-2} , igual a la correspondiente a la masa promedio para la condición original ó prístina ($0,237 \text{ Mg suelo seco m}^{-2}$).

▪ **En base a un sistema de material coordinado (SCM) propuesto por McBratney & Minasny (2010):**

Este es también un método gráfico, en el cual el SC se obtiene por interpolación, considerando como coordenadas la masa mineral de suelo acumulada y el C acumulado, para las distintas profundidades. En el presente trabajo, se efectuó una interpolación basada en una masa mineral de suelo de 227 kg m^{-2} , calculada a partir de los valores medios de C y de las masas de suelo correspondientes a la condición original.

2.3.24 Relaciones entre indicadores químicos y biológicos asociados a la materia orgánica del suelo

Se establecieron las relaciones: **MOP/MOT** (Píccolo *et al.*, 1998; Galantini *et al.*, 2004; 2008); **Npm/N**, **MOP/Res** (Toledo *et al.*, 2013); el Índice de labilidad (**IL**), el índice de reserva de carbono (**IRC**) (Blair *et al.*, 1995); como así también las relaciones de estratificación del carbono orgánico del suelo (**COSr**) y del nitrógeno potencialmente mineralizable (**Npmr**), propuestos por Franzluebbers (2002). Las relaciones de estratificación **COSr** y **Npmr** para los distintos usos de suelo, fueron calculadas a partir de las concentraciones de carbono orgánico y de los valores de nitrógeno potencialmente mineralizable obtenidos a la

profundidad de 0–0,10 m, dividida la correspondiente a 0,20-0,30 m (COSr_1 y Npmr_1 respectivamente) (Franzluebbbers, 2002), como así también la relación de estratificación del CO considerando las profundidades 0-0,10 m y 0,10-0,20 m (COSr_2).

La **labilidad del carbono** (L) fue calculada dividiendo el contenido de carbono lábil (CL) por el de carbono no lábil (CNL).

El **índice de labilidad** (IL) fue calculado mediante el cociente: L cultivo/L selva y el **índice de reserva de carbono** (IRC) dividiendo el carbono del suelo cultivado por el carbono del suelo virgen (selva).

PARTE II: SELECCIÓN DE INDICADORES Y DESARROLLO DE ÍNDICES

CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO

3.1 INTRODUCCIÓN

El uso del suelo, las prácticas de manejo, los sistemas de cultivos, el uso de fertilizantes y pesticidas, conllevan a cambios en el funcionamiento del suelo (Wang & Gong, 1998; Doran & Zeiss, 2000; Wienhold *et al.*, 2006), surge así la necesidad de evaluación y seguimiento de los cambios en los atributos del suelo, mediante la obtención de indicadores que permitan evaluar las ganancias y pérdidas de calidad provocados por determinados usos y prácticas de manejo (Mariscal Sancho, 2008).

A pesar de la creciente preocupación acerca de la disminución de CS, y su impacto en la capacidad productiva y la calidad ambiental (Reicosky, 2007), no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad (Arshad & Coen, 1992; Cruz *et al.*, 2004).

La multiplicidad de factores que intervienen en un agro-ecosistema (Villamil *et al.*, 2008) y dentro de este en el sistema-suelo, hacen que cuantificar la calidad, no sea sencillo.

Es posible efectuar su evaluación, mediante la determinación de indicadores de calidad (IC), estableciendo así las ganancias y pérdidas provocadas por determinados usos y prácticas de manejo (Mariscal Sancho, 2008), siendo necesario que los IC cumplan con las siguientes condiciones (USDA, 2001):

- Que sean fáciles de medir.
- Que midan los cambios en las funciones del suelo.
- Que abarquen las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
- Que sean accesibles a los evaluadores y aplicables en condiciones de campo.

Al mismo tiempo que posibiliten: analizar la situación actual del suelo con respecto a la funcionalidad específica que se evalúa, identificar los puntos

críticos respecto de su sustentabilidad, prever los impactos de una intervención y minimizarlos; y ayudar en la toma de decisiones (Etchevers *et al.*, 2009).

Es decir que se consideran IC, a aquellas propiedades del suelo que resultan más sensibles a los cambios producidos por el uso a través del tiempo (Schoenholtz *et al.*, 2000; Arshad & Martin, 2002), y que reflejan cambios estadísticamente significativos en la magnitud y/o dirección en función del objetivo (Villamil *et al.*, 2008).

Los IC, varían con la escala, el objetivo de estudio, el tipo y las condiciones de suelo, el uso del suelo. Las situaciones no son universales, por ejemplo: pastizales, humedales, tierras agrícolas (Arshad & Coen 1992), por lo que es necesario integrar diferentes atributos de calidad al mismo tiempo, evaluar cada condición particular de suelo (Aparicio & Costa, 2007) y seleccionar los IC en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio (Cantú *et al.*, 2007).

Numerosas variables edáficas fueron propuestas como potenciales indicadores de calidad en una amplia escala temporal y espacial, y en diferentes sistemas de manejo, por su sensibilidad para reflejar cambios. Sin embargo, unos pocos han sido probados y validados (Karlen *et al.*, 1997).

Autores como Wander & Bollero (1999); Dalurzo (2002); Giuffré *et al.* (2006); Shukla *et al.* (2006); Xu *et al.* (2006); Villamil *et al.* (2008); Rojas (2012) entre otros, han evaluado la sensibilidad de distintos indicadores y seleccionado IC, a través de la aplicación de técnicas estadísticas univariadas y/o multivariadas.

Dentro de los indicadores físicos, fueron propuestos: espacio aéreo, humedad equivalente, (Dalurzo, 2002); densidad aparente, estabilidad de agregados (Wander & Bollero, 1999; Cantú *et al.*, 2007; Ferreras *et al.* 2007; Villamil *et al.*, 2008; Rojas, 2012), conductividad hidráulica (Romaniuk, 2010), diámetro medio ponderado (Sharma *et al.*, 2008), resistencia a la penetración (Wander & Bollero, 1999; Arshad & Martin, 2002; Dalurzo, 2002; Ferreras *et al.* 2007; Rojas,

2012), fracción erosionable por el viento (Rojas, 2012) e infiltración (Wander & Bollero, 1999; Cantú *et al.*, 2007).

Entre los indicadores químicos: carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo extraíble, pH, (Wander & Bollero, 1999; Dalurzo, 2002; Giuffré *et al.*, 2006; Cantú *et al.*, 2007; Rojas, 2012), conductividad eléctrica (Wander & Bollero, 1999; Arshad & Martin, 2002); aluminio e hidrógeno intercambiables (Dalurzo, 2002); bases intercambiables (Wander & Bollero, 1999; Cantú *et al.*, 2007), disponibilidad de nutrientes, pH, conductividad eléctrica y sodio intercambiable (Arshad & Coen, 1992).

También las variables bioquímicas y biológicas, pueden tener un rol fundamental como indicadores tempranos y sensibles de la degradación o la restauración de suelo, como consecuencia de diferentes prácticas de manejo (Marinari *et al.*, 2006; Mijangos *et al.*, 2006). Actualmente se ha intensificado su estudio, ya que describen los principales procesos metabólicos que ocurren en el suelo, siendo de gran utilidad para evaluar la calidad edáfica (Ferrerías *et al.*, 2009). Dentro de éstos indicadores se destacan: el carbono de la biomasa microbiana (Costantini, *et al.*, 1996; Wander & Bollero, 1999; Brejda *et al.*, 2000), las actividades de las enzimas ureasas, glucosidasas y fosfatasas (Leirós *et al.* 1999), la respiración del suelo (Costantini *et al.*, 1996, Doran & Jones, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Wander & Bollero, 1999; Brejda *et al.*, 2000; Saggar *et al.*, 2001; Dalurzo, 2002; Giuffré *et al.*, 2006; Ferreras *et al.*, 2009), el carbono soluble (Giuffré *et al.*, 2006), la materia orgánica particulada (Yakovchenko *et al.*, 1996; Wander & Bollero, 1999; Dalurzo, 2002; Giuffré *et al.*, 2006; Galantini & Suñer, 2008), la actividad de las fosfatasas ácidas (Chen *et al.*, 2003; Dalurzo *et al.*, 2005; Yoshioka *et al.*, 2006), y el potencial del suelo para mineralizar nitrógeno (Leirós *et al.*, 1999; Wander & Bollero, 1999; Fabrizzi *et al.*, 2003; Galvis-Spínola & Hernández-Mendoza, 2004; Dalurzo *et al.*, 2005), siendo este último un indicador relacionado a la calidad de la materia orgánica del suelo (Drinkwater *et al.*, 1996).

Si bien los atributos biológicos resultan buenos indicadores (Saggar *et al.*, 2001), no siempre son incluidos en los trabajos de cuantificación de calidad, debido a que su evaluación analítica es considerada más compleja y difícil de interpretar (Kennedy & Papendick, 1995). Romaniuk (2010), evaluando calidad de suelos bajo sistemas intensivos y extensivos de producción agrícola, determinó que los mismos fueron más sensibles que los atributos físicos, sin embargo enfatizó que los indicadores varían de acuerdo al tipo de suelo, sistema de manejo y condiciones ambientales, entre otros factores.

Los IC seleccionados por los distintos autores en cada situación particular, refuerzan la idea de que los mismos no son universales (Brejda *et al.*, 2000b), y deben ser desarrollados localmente (Romaniuk, 2010; Rojas, 2012).

Los indicadores individuales, no son suficientes para estimar la calidad de un suelo, dadas las numerosas interacciones e intercambios que se dan en el sistema-suelo (De la Rosa, 2008).

Una manera de cuantificar la calidad y monitorear su dinámica, es comparar los valores de distintos parámetros obtenidos para un determinado sistema de cultivo o manejo, con los correspondientes a suelos nativos, sin disturbio antrópico y desarrollados bajo una vegetación climax en equilibrio con el ambiente, como lo efectuado por autores como Dick 1994; Doran *et al.*, 1994; Trasar-Cepeda *et al.*, 1998, entre otros. Para ello, se considera fundamental identificar primeramente los indicadores de calidad y conformar un conjunto mínimo de datos (CMD) a partir del cual se puede cuantificar la calidad (Karlen *et al.*, 2001; Arshad & Martin, 2002). Para su selección, se pueden efectuar consultas a expertos y/o aplicar análisis multivariado como análisis de componentes principales (ACP), el cual permite identificar los indicadores que mejor representan la variabilidad en un gran conjunto de datos existente (Karlen *et al.*, 2001).

Villamil *et al.* (2008) estudiaron, mediante análisis multivariado, la sensibilidad de diferentes variables para actuar como potenciales indicadores en sistemas de

producción extensivos bajo siembra directa, y propusieron el uso de técnicas de visualización multidimensional de los datos para lograr una mejor comprensión de la CS. Si bien esta técnica fue muy empleada en diferentes ciencias como: Naturales, Geografía, Estadísticas, (Swayne *et al.*, 2006); hasta el momento, es de poco uso en el campo de la Agronomía, habiendo sido aplicada por Villamil *et al.* (2008), perteneciente al grupo de investigación de la Universidad de Illinois-USA.

Numerosos autores han empleado técnicas univariadas y multivariadas para la selección del CMD (Wander & Bollero, 1999; Dalurzo, 2002; Karlen *et al.*, 2001; Ferreras *et al.*, 2009; Romaniuk, 2010; Rojas, 2012). Dentro del conjunto mínimo de datos, muchos indicadores presentan interdependencia, es decir que el valor de uno es afectado por los valores de uno o más de los otros parámetros (Arshad & Martin, 2002), por cuanto es importante también evaluar las correlaciones entre indicadores.

3.2 OBJETIVOS

- Aplicar técnicas de visualización multidimensional y univariadas a los efectos de identificar los indicadores de calidad (IC) físicos, químicos y biológicos más sensibles a los cambios en el uso del suelo.
- Conformar con los IC más sensibles, un CMD para cada categoría de variables y para los primeros 0,30 m del perfil de suelo, a fin de construir posteriormente los índices de calidad.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con el set de datos proveniente del Proyecto “Dinámica del fósforo en Oxisoles bajo distintos sistemas de uso”. El mismo fue llevado a cabo en la provincia de Misiones, Argentina (27°41’S, 55°11’W), en los Departamentos Alem, Oberá, Cainguás y Guaraní. Se seleccionaron reservas de selva subtropical (Sv), y lotes de productores con similares características de producción de tabaco (*Nicotiana tabacum*), cultivo de citrus (*Citrus satsuma*), y cultivo

convencional de yerba mate (*Ilex paraguariensis*), donde se determinaron 28 variables de suelo (12 físicas, 10 químicas y 6 biológicas). La descripción del área bajo estudio, los tratamientos y la metodología empleada para la determinación de los distintos atributos, fueron descriptas en el Capítulo I.

3.3.1 Categorías de variables: para el análisis de los datos, las variables de suelo fueron agrupadas en tres categorías: propiedades físicas, químicas y biológicas.

-Físicas: contenidos de arena (Are), limo (Li) y arcilla (Arc), densidad aparente (Da), densidad real (Dr), espacio aéreo (Eae), estabilidad de agregados (EA), porosidad capilar (Pc), porosidad total (PT), humedad equivalente (HE), resistencia a la penetración (RP), e infiltración básica (Ib).

-Químicas: pH en KCl, carbono orgánico (CO), nitrógeno total (N), fósforo extractable (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables, acidez intercambiable (H), aluminio intercambiable (Al) y capacidad de intercambio catiónico (T).

-Biológicas: respiración de suelo (Res), materia orgánica particulada total (MOP); materia orgánica particulada, fracción gruesa (MOPa); materia orgánica particulada, fracción fina (MOPb); nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm) y actividad enzimática de las fosfatasas ácidas (Enz).

3.3.2 Análisis estadístico: se realizaron análisis univariado y multivariado, previo al análisis de los datos se verificó a partir de los residuos, que las variables tuviesen distribución normal utilizando el procedimiento de Shapiro Wilks modificado y la homocedasticidad de las varianzas por el método gráfico de residuos versus predichos y de cajas (Di Rienzo, 2011).

Con la finalidad de obtener mayor conocimiento sobre la estructura de las observaciones y variables en estudio, se efectuó un análisis exploratorio de los datos a través una visualización multidimensional de los mismos (Villamil *et al.*, 2008), mediante el empleo de análisis de componentes principales (ACP). Esta técnica descriptiva, permite estudiar las relaciones que existen entre las variables cuantitativas, sin considerar a priori, ninguna estructura, ni de

variables, ni de individuos (Palm, 1998), de manera de visualizar simultáneamente el comportamiento de las variables, y determinar cuáles son las que más influyen en la dispersión de los individuos (Villamil *et al.*, 2008; Rojas, 2012).

Se utilizó el paquete FactoMineR, específicamente diseñado para realizar análisis multivariado con el programa R Versión 2.15.0 (R-Project, 2012). Se obtuvieron elipses con una confianza de 95% y se las incluyeron en los gráficos de dispersión de individuos, a fin de determinar las variables que permitieron separar entre usos de suelo. Los individuos fueron coloreados de acuerdo a los tratamientos de la siguiente manera: suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro). Cada individuo correspondió a un lote, estando representados 48 lotes en total (12 por tratamiento).

Como las variables fueron medidas en distintas unidades, se realizaron ACP normados, es decir basados en la matriz de correlaciones a fin de que tengan igual importancia todas las variables originales. Para ello se calcularon las componentes principales sobre las variables originales estandarizadas (media=0 y varianza=1).

Se aplicó análisis de la varianza (ANOVA), a fin de determinar si existían diferencias significativas en algunas variables edáficas referidas a la calidad dinámica (las que son afectadas por el uso del suelo). Se efectuó comparaciones de medias mediante una Prueba LSD ($P < 0,05$), utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011), a los efectos de determinar cuáles variables resultaban sensibles (Ferrerías *et al.*, 2009; Rojas, 2012) y permitían distinguir entre usos de suelo.

Se estableció que aquellos atributos que no resultaran significativamente afectados por el uso del suelo ($P > 0,05$), no serían considerados dentro del CMD (Wander & Bollero, 1999; Rojas, 2012).

Para el análisis de los coeficientes de variación (CV), se empleó la clasificación propuesta por Warrick & Nielsen (1980), en la cual una baja variabilidad corresponde a CV inferiores al 12%, variabilidad media para CV entre 12 y 60%, y alta variabilidad para CV mayores al 60%; también se tuvo en cuenta si los CV encontrados para los distintos parámetros cabían dentro de los esperados según Pennock *et al.* (2008).

Los datos fueron analizados mediante la aplicación de los programas INFOSTAT 2011 (Di Rienzo, 2011) y R, Versión 2.15.0 (R-Project, 2012).

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de ACP para cada categoría de variables y cada profundidad, permitió construir círculos de correlaciones, posibilitando visualizar rápidamente las relaciones existentes entre variables, y entre éstas y las componentes principales. Se obtuvieron gráficos Bi-plot, representando la nube de individuos y su distribución respecto a las 2 primeras componentes, con elipses de confianza al 95%.

Los resultados obtenidos en el análisis estadístico univariado (ANOVA y Prueba de LSD, $\alpha=5\%$) para las variables físicas, químicas y biológicas, se pueden observar en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, respectivamente.

3.4.3 INDICADORES FÍSICOS

En base a los coeficientes de correlación de cada variable física respecto a las componentes 1 y 2, se obtuvieron los círculos de correlación correspondientes a la primera (Fig. 3.1), segunda (Fig. 3.3) y tercera profundidad (Fig. 3.5).

Para la primera profundidad, la componente 1, se correlacionó positivamente con los parámetros: porosidad total, espacio aéreo, estabilidad de los agregados, humedad equivalente, y negativamente con densidad aparente, densidad real y porosidad capilar. Es decir que se relacionó con atributos vinculados a la estructura del suelo, y su estabilidad.

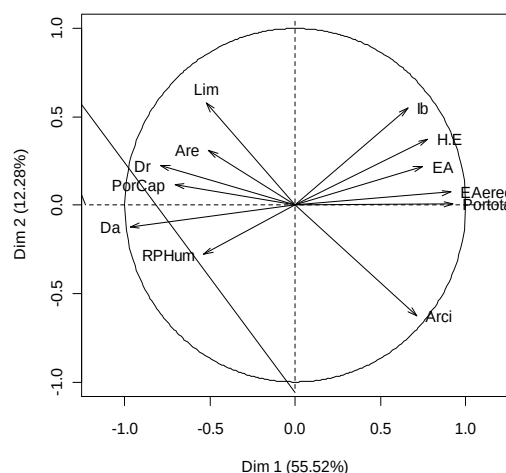


Figura 3.1: Círculo de correlaciones con la representación de las variables físicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0-0,10 m.

La segunda componente, estuvo relacionada a la textura del suelo, presentando correlación positiva con el contenido de limo, y negativa con el de arcilla.

A través del círculo de correlaciones, se pudo interpretar en la nube de individuos, las posiciones relativas de éstos sobre cada componente o dimensión (Fig. 3.2).

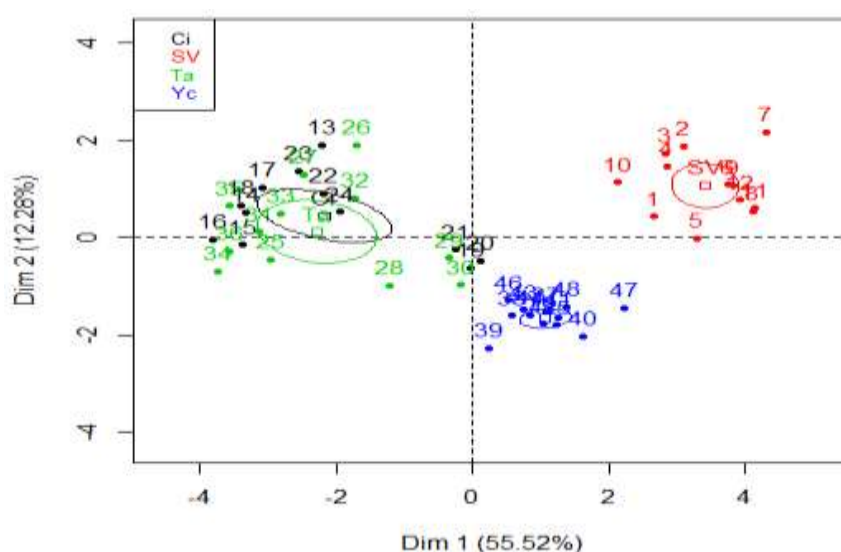


Figura 3.2: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables físicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0-0,10 m. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

Se puede observar para la dimensión 1, que los suelos bajo selva se distinguieron de los agrícolas presentando los mayores valores de porosidad total, espacio aéreo, estabilidad de los agregados, humedad equivalente y los

Articulando el círculo de correlaciones (Fig. 3.3), con el gráfico de Bi-plot (Fig. 3.4), se puede observar que al igual que en el primer espesor, los suelos bajo selva presentaron las mejores condiciones físicas.

La CP1 separó los suelos bajo yerba del resto de los cultivados, presentando mejores características físicas.

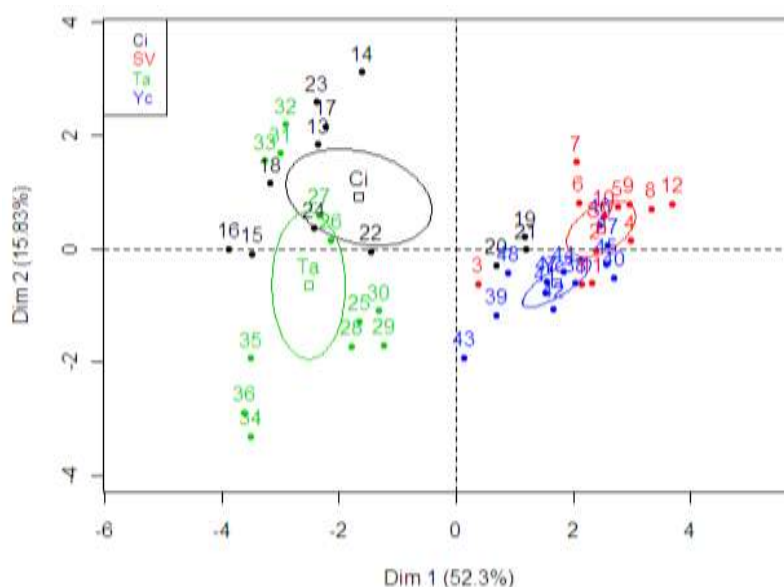


Figura 3.4: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables físicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0,10-0,20 m. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

Para la tercera profundidad, la primera componente se correlacionó positivamente con las variables porosidad total, espacio aéreo, contenido de arcilla y negativamente con densidad aparente, porosidad capilar, contenido de arena. La segunda componente, lo hizo positivamente con la humedad equivalente y negativamente con el contenido de limo (Fig. 3.5).

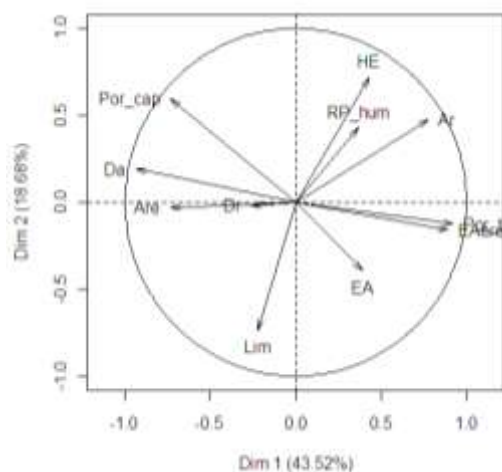


Figura 3.5: Círculo de correlaciones con la representación de las variables físicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construídas para la profundidad de 0,20-0,30 m.

En la figura 3.6, se observan las proyecciones de los individuos en el plano de las dos primeras componentes. Sólo se pudieron distinguir los usos de suelo respecto a la dimensión 1.

Los suelos bajo selva, con mayor porosidad total, espacio aéreo, contenido de arcilla, estabilidad de agregados y menor densidad aparente, se ubicaron sobre la derecha del plano, como resultado de su mejor condición física.

Los suelos bajo citrus y tabaco con mayor densidad aparente, mayor porosidad capilar, menor estabilidad de agregados, se ubicaron a la izquierda, debido a un proceso de compactación y consecuentemente pérdida de estructura.

En las tres profundidades evaluadas, la mayor variabilidad estuvo dada por los atributos: densidad aparente, espacio aéreo, estabilidad de agregados, humedad equivalente, resistencia a la penetración e infiltración básica.

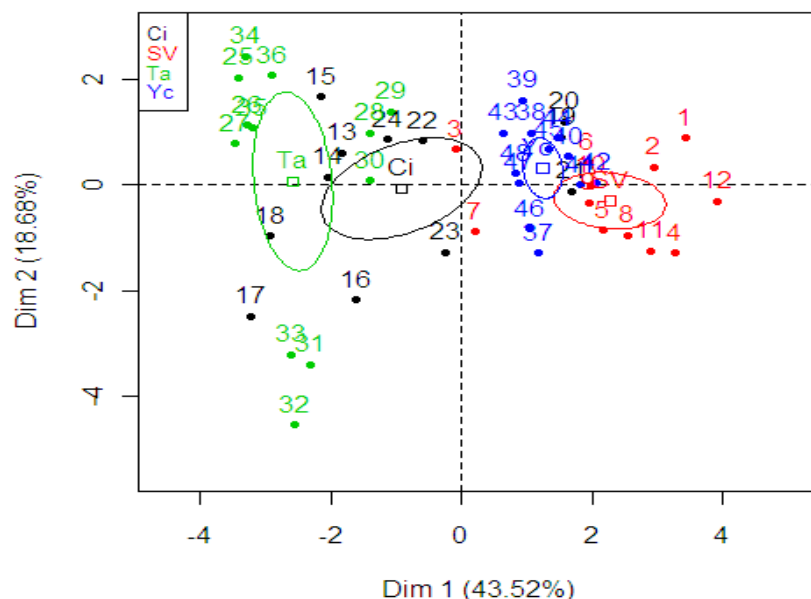


Figura 3.6: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables físicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad de 0,20-0,30m. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

La mayor densidad aparente en los suelos cultivados se encuentra relacionada con una compactación del suelo por el tránsito y peso de las maquinas e implementos utilizados (Cavenage *et al.*, 1999), una menor estabilidad de la estructura (Horn *et al.*, 1995), una disminución de la macroporosidad (Torres Viana *et al.*, 2011) y una reducción de los contenidos de materia orgánica (Keller & Håkansson, 2010; Torres Viana *et al.*, 2011).

En la Tabla 3.1, se pueden observar los resultados correspondientes al ANOVA de las variables físicas.

En todos los casos (excepto para infiltración), los coeficientes de variación (CV) se presentaron por debajo del 34%, resultando bajos a moderados, y dentro de los valores esperados para los distintos parámetros (Pennock *et al.*, 2008).

Tabla 3.1: Resultados del análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$) para las variables físicas evaluadas para las profundidades: 0-0,10 m (1); 0,10-0,20 m (2) y 0,20-0,30 m (3), en los sistemas correspondientes a la Etapa I: selva (Sv), citrus (Ci), tabaco (Ta) y yerba mate (Yc). Medias, coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p-valor).

Propiedades Físicas							
	Prof.	Sv	Ci	Ta	Yc	CV	p-valor
Ar %	1	11,37b	15,80a	15,34a	9,02b	23,78	<0,0001
	2	10,36b	14,97a	14,90a	8,43b	26,39	<0,0001
	3	8,81b	13,17a	14,47a	6,00c	29,20	<0,0001
Li %	1	14,54bc	18,43a	17,50ab	13,06c	25,03	0,0058
	2	13,58b	17,28a	15,27ab	12,45b	26,27	0,0211
	3	12,36a	12,97a	13,54a	12,65a	25,49	0,8366
Arc %	1	74,09b	65,32c	67,16c	77,92a	5,33	<0,0001
	2	76,07a	67,49b	69,83b	79,11a	5,11	<0,0001
	3	78,82a	73,86b	71,98b	81,35a	4,86	<0,0001
Dr g.cm ⁻³	1	2,65b	2,87a	2,82a	2,68b	3,09	<0,0001
	2	2,78b	2,90a	2,87a	2,72b	2,80	<0,0001
	3	2,86b	2,94a	2,85b	2,81c	1,80	<0,0001
Da g.cm ⁻³	1	0,75c	1,14a	1,19a	0,96b	9,16	<0,0001
	2	0,81d	1,08b	1,16a	0,91c	8,23	<0,0001
	3	0,82d	1,06b	1,18a	0,97c	7,83	<0,0001
HE %	1	35,88a	27,74bc	26,23c	27,97b	6,91	<0,0001
	2	32,58a	27,81c	28,58c	30,70b	7,08	<0,0001
	3	32,36a	30,65ab	29,71b	31,06ab	7,26	0,0470
EA %	1	94,84a	85,06b	80,28b	85,26b	7,12	<0,0001
	2	91,53a	88,34a	82,19b	88,28a	5,53	0,0003
	3	83,81ab	85,44a	78,90b	83,07ab	7,95	0,1082
Eae %	1	44,79a	28,56c	26,25c	37,07b	13,77	<0,0001
	2	44,44a	32,92c	27,25d	38,75b	11,70	<0,0001
	3	44,89a	30,90b	24,54c	35,11b	15,24	<0,0001
Pc %	1	26,86b	31,61a	31,29a	26,94b	10,07	0,0001
	2	26,38c	29,82b	33,15a	27,86bc	9,17	<0,0001
	3	26,50c	32,27ab	35,08a	30,23b	11,54	<0,0001
PT %	1	71,65a	60,18c	57,54c	64,00b	6,17	<0,0001
	2	70,82a	62,74c	60,40c	66,61b	5,64	<0,0001
	3	71,39a	63,17b	59,62c	65,35b	6,19	<0,0001
RP Kpa	1	0,30c	0,73a	0,60ab	0,54b	33,02	<0,0001
	2	0,74b	0,97a	0,83ab	0,85ab	25,79	0,0971
	3	1,23a	1,34a	1,01a	1,33a	33,57	0,1917
Ib cm.h ⁻¹	1	52,41a	8,24b	15,92b	6,66b	55,85	<0,0001

Ar: arena, **Li:** limo; **Arc:** arcilla, **Da:** densidad aparente, **Dr:** densidad real, **Eae:** espacio aéreo, **EA:** estabilidad de agregados, **Pc:** porosidad capilar, **PT:** porosidad total, **HE:** humedad equivalente, **RP:** resistencia a la penetración, **Ib:** infiltración básica.

La infiltración presentó un CV mayor (55%), pero se mantuvo dentro de valores que suelen ser encontrados para esa variable (Warrick & Nielsen, 1980; Dalurzo, 2002; Da Silva Martins *et al.*, 2010).

Para los primeros 0,20 m del perfil, todas las variables físicas evaluadas lograron distinguir entre usos de suelo ($p < 0,05$), excepto resistencia a la penetración que sólo presentó diferencias significativas en la primera profundidad. Los suelos prístinos presentaron menor densidad aparente, mayor estabilidad de agregados, mayor espacio aéreo, mayor infiltración, menor resistencia a la penetración y mayor capacidad para retener agua para las plantas, que los suelos agrícolas. En todos los casos el espacio aéreo fue mayor al 10%, por cuanto no presentó valores restrictivos para un buen desarrollo radical (Grable & Siemer, 1968).

Considerando sólo los primeros 0,10 m de profundidad, ninguna de las variables físicas logró distinguir entre los tratamientos citrus y tabaco, corroborando lo visualizado mediante el uso de las técnicas multivariadas.

Para la tercera profundidad, sólo las variables contenido de limo, espacio aéreo y resistencia a la penetración, no resultaron sensibles.

En base a los resultados obtenidos, se conformó un CMD para la categoría “variables físicas”, seleccionando por su sensibilidad para distinguir usos de suelo, a los siguientes indicadores: densidad aparente (D_a), espacio aéreo (E_{ae}), estabilidad de agregados (E_A), humedad equivalente (H_E), resistencia a la penetración (R_P) e, infiltración básica (I_b). Todas ellas son variables dinámicas, ya que pueden cambiar en respuesta al uso y manejo del suelo y por tanto, están fuertemente influenciadas por las prácticas agronómicas (Pierce & Larson, 1993). No se consideraron densidad real ni los atributos asociados a la textura del suelo (contenidos de arena, limo y arcilla) por responder a la calidad inherente del suelo (Pierce & Larson, 1993; USDA, 2008), y ser considerados atributos estáticos ó de escasa variación a través del tiempo, no afectados por el uso (Doran & Parkin, 1996; Dalurzo, 2002). Tampoco se incluyeron porosidad capilar y porosidad total, por ser variables obtenidas por cálculo, e intervenir directamente en la determinación del espacio aéreo, el cual sí fue seleccionado

por ser uno de los atributos más afectados por el manejo (Richard *et al.*, 2001; Dexter, 2004) y por estar relacionado con la actividad biológica del suelo (Lowery *et al.*, 1996).

3.4.4 INDICADORES QUÍMICOS:

En base a los coeficientes de correlación de cada variable química respecto a las componentes, se obtuvieron los círculos de correlación correspondientes a la primera (Fig. 3.7), segunda (Fig. 3.9) y tercera profundidad (Fig. 3.11).

Para los primeros 0,10m del perfil, la primera componente se correlacionó positivamente con los parámetros: calcio intercambiable, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total, carbono orgánico, pH y magnesio. En tanto que la segunda, lo hizo positivamente con los atributos: hidrógeno y aluminio intercambiables y negativamente con fósforo disponible y potasio intercambiable.

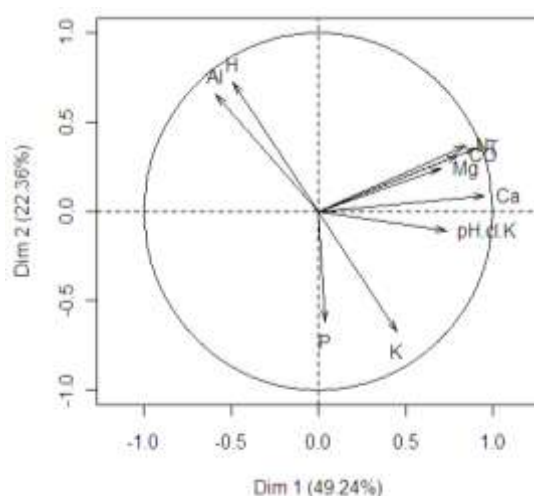


Figura 3.7: Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0-0,10 m.

Relacionando las figuras 3.7 y 3.8, se puede observar que los suelos sin disturbar se ubicaron principalmente arriba y a la derecha del plano, presentando los mayores contenidos de carbono orgánico, nitrógeno total, calcio y magnesio intercambiables. Los suelos cultivados se ubicaron a la izquierda, presentando bajo cultivo de yerba, menor pH, mayor acidez cambiante (Al e H), y menor

contenido de bases intercambiables que los suelos bajo citrus y tabaco, los cuales presentaron no solo mayor contenido de bases sino también de fósforo, debido a que han recibido prácticas de encalado y fertilizaciones periódicas.

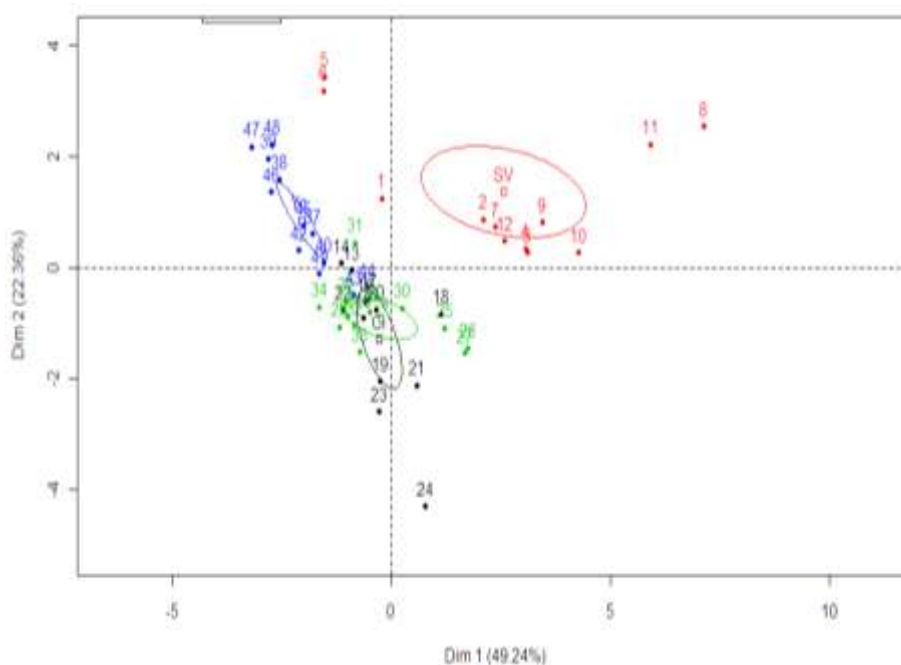


Figura 3.8: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables químicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2 para la profundidad de 0-0,10 m. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

Para la segunda profundidad, la primera componente se correlacionó positivamente con las variables: calcio, pH, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, y negativamente con el fósforo disponible, ubicándose en una posición intermedia entre ambas componentes los atributos: carbono orgánico, nitrógeno total, aluminio e hidrógeno intercambiables. La segunda componente se correlacionó positivamente con el fósforo disponible (Fig. 3.9).

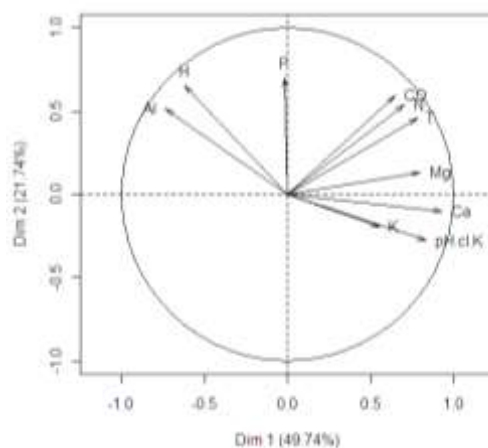


Figura 3.9: Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,10-0,20 m.

Relacionando el círculo de correlaciones (Fig. 3.9) con la figura 3.10, se puede observar que los resultados son similares a la profundidad anterior.

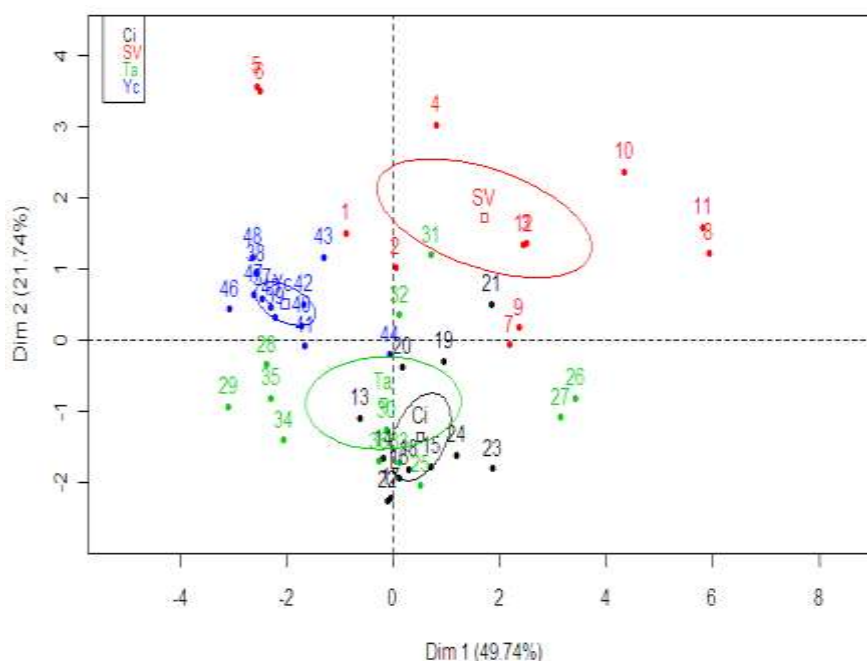


Figura 3.10: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables químicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad 0,10-0,20 m. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

En la tercera profundidad, tomaron mayor protagonismo el pH, las bases y la acidez cambiables como principal fuente de variabilidad, asociados a la componente 1 (Fig 3.11).

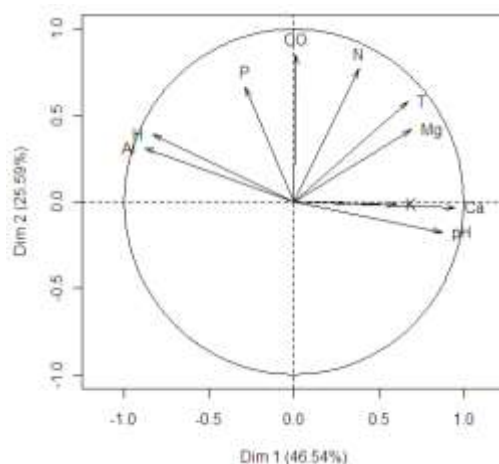


Figura 3.11: Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,20-0,30 m.

Los suelos prístinos y los cultivados sin encalar (Yc) presentaron una mayor acidez que los suelos bajo Ci y Ta que recibieron enmiendas cálcicas (Fig. 3.12). La segunda componente, se correlacionó a los atributos carbono orgánico, nitrógeno y fósforo, los suelos bajo selva se ubicaron arriba, presentando una mayor fertilidad.

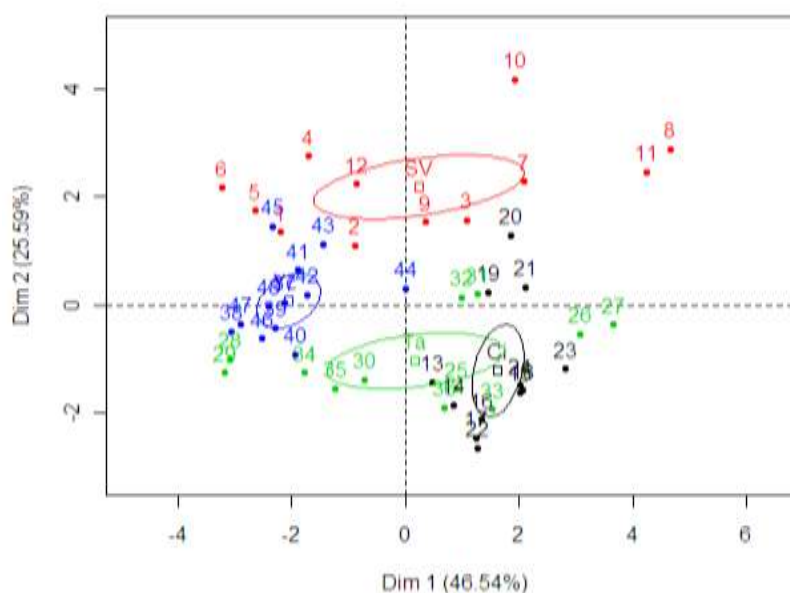


Figura 3.12: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables químicas: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2, para la profundidad 0,20-0,30 m. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

Los resultados del ANOVA y de la Prueba LSD ($p < 0,05$) obtenidos para las propiedades químicas, se pueden observar en la Tabla 3.2.

Los coeficientes de variación (CV) fueron bajos (<20%) para las variables pH, CO y N, y medios a altos para los cationes intercambiables y el fósforo disponible, manteniéndose dentro de los CV esperados para estas variables de suelo (Pennock *et al.*, 2008).

La reacción de los suelos, en todos los casos fue fuertemente ácida, con valores medios de pH entre 3,87 y 4,35. En las 3 profundidades evaluadas, todas las variables químicas permitieron distinguir entre usos de suelo ($p < 0,05$), excepto el pH que sólo presentó diferencias significativas en la 2ª y 3ª profundidad.

Los suelos prístinos mostraron una mayor fertilidad que los suelos agrícolas, presentando los mayores valores de capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, y nitrógeno total.

El uso agrícola continuo favoreció la rápida mineralización de la materia orgánica del suelo alterándose la condición original.

Las disminuciones de MO producidas como consecuencia de la inclusión de los suelos para la agricultura, son tradicionalmente atribuidas al efecto físico del laboreo, que destruye los agregados del suelo y expone materiales orgánicos previamente inaccesibles a una rápida descomposición (Janzen *et al.*, 1997; Dalurzo, 2002). Si bien, este proceso es uno de los motivos de la caída de MO luego del cultivo, probablemente sea el resultado de múltiples causas, como un balance negativo de carbono bajo agricultura, porque la pérdida de carbono edáfico es mayor que sus entradas, las cuales son generalmente menores que en los sistemas prístinos y porque ocurre un incremento en la remoción del C producido en los agroecosistemas, debido que el objetivo de la agricultura es capturar el carbono en formas de producción negociables (Voroney *et al.*, 1981; Dalurzo, 2002; Casierra-Posada & Aguilar-Avenidaño, 2007).

Tabla 3.2: Resultados del análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$) para las variables químicas evaluadas para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m (1); 0,10-0,20 m (2) y 0,20-0,30 m (3) en los sistemas correspondientes a la Etapa I: selva (Sv), citrus (Ci), tabaco (Ta) y yerba mate (Yc). Medias, coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p-valor).

Propiedades Químicas							
	Prof.	Sv	Ci	Ta	Yc	CV	p-valor
pH	1	4,35a	3,97ab	4,28ab	3,81b	15,80	0,152
KCl	2	4,13a	4,29a	4,12ab	3,68b	13,42	0,0407
	3	3,87b	4,36a	4,03ab	3,66b	11,62	0,0056
CO	1	40,3a	23,5b	21,6bc	18,9c	16,70	<0,0001
g kg⁻¹	2	21,7a	17,2b	16,2b	17,2b	10,34	<0,0001
	3	17,5a	12,4c	13,5bc	14,8b	11,86	<0,0001
N	1	4,7a	2,4b	2,0c	1,9c	19,32	<0,0001
g kg⁻¹	2	2,7a	1,9b	1,5c	1,6bc	18,38	<0,0001
	3	2,0a	1,5b	1,3b	1,4b	16,16	<0,0001
P	1	4,59b	12,48a	6,48b	3,82b	94,63	0,0086
mg kg⁻¹	2	2,33a	0,91b	1,86a	1,93a	51,27	0,0032
	3	1,51a	0,42c	0,98b	1,20ab	48,68	<0,0001
K	1	0,63ab	0,71a	0,72a	0,41b	47,96	0,0415
cmolc kg⁻¹	2	0,43a	0,59a	0,57a	0,19b	63,22	0,0035
	3	0,33a	0,48a	0,51a	0,13b	66,37	0,0012
Ca	1	16,11a	7,48b	6,89bc	3,45c	54,91	<0,0001
cmolc kg⁻¹	2	8,44a	6,85a	6,04a	3,20b	52,48	0,0025
	3	6,05ab	7,86a	5,66b	3,19c	44,32	0,0006
Mg	1	3,24a	0,97b	1,90ab	0,75b	98,24	0,0030
cmolc kg⁻¹	2	1,83a	1,12b	1,30ab	0,53c	56,02	0,0003
	3	1,50a	1,23a	1,01ab	0,48b	67,35	0,0078
H	1	1,72ab	0,60c	0,87bc	2,59a	85,75	0,0011
cmolc kg⁻¹	2	2,21ab	0,86c	1,43bc	3,00a	78,24	0,0055
	3	2,68a	0,82b	1,33b	2,93a	65,78	0,0003
Al	1	0,54b	0,05b	0,08b	0,81a	118,02	<0,0001
Cmolc kg⁻¹	2	0,97b	0,09c	0,62bc	2,23a	98,73	<0,0001
	3	1,29b	0,18c	0,60c	2,21a	72,51	<0,0001
T	1	22,24a	9,80b	10,39b	9,00b	36,17	<0,0001
cmolc kg⁻¹	2	13,88a	9,50b	9,35b	9,14b	24,40	0,0001
	3	11,85a	10,57a	8,50b	8,94b	18,01	0,0001

pH: pH en KCl, CO: carbono orgánico, N: nitrógeno total, P: fósforo extractable, K: potasio; Ca: calcio, Mg: magnesio; H: acidez intercambiable; Al: aluminio intercambiable; T: capacidad de intercambio catiónico.

En todos los tratamientos, los contenidos de nitrógeno total, se mantuvieron dentro del intervalo considerado medio para suelos tropicales de América Latina (Fassbender & Bornemisza., 1987).

El P asimilable en general fue bajo, con valores entre 0,42 y 12,48 mg kg⁻¹, pero

dentro de los valores esperados para suelos meteorizados, ricos en sesquióxidos y con una alta capacidad de fijación del P como los Oxisoles, donde constituye una de las limitantes más difundidas (Bedford *et al.*, 1999; Dalurzo, 2002; Vazquez *et al.*, 2004), siendo los suelos que recibieron fertilizaciones (citrus y tabaco) los que presentaron en superficie los mayores valores de P.

En todos los casos, la suma de Ca, Mg y K (Suma de bases) y su relación con la capacidad de intercambio catiónico, arrojó una la saturación de bases >35%.

Los mayores contenidos de Al, se encontraron en suelos agrícolas no encalados (yerba mate), pero en ninguno de los casos bajo estudio, la saturación de aluminio intercambiable fue >40%, y ni tampoco las relaciones Ca/Al, Mg/Al y (Ca+Mg+K)/Al fueron <1, es decir que no se presentaron concentraciones tóxicas para el desarrollo vegetal, como tampoco se encontraron deficiencias de bases inducidas por aluminio (Satur *et al.*, 1998; Casierra-Posada & Aguilar-Avendaño, 2007).

El efecto de competencia del aluminio sobre la toma de calcio y magnesio, justifica que las relaciones entre las bases y el aluminio cambiables, sean mejores parámetros para predecir el riesgo de deficiencia de bases, que la cantidad de alguno de los elementos en forma individual (Casierra-Posada & Aguilar-Avendaño, 2007).

Para integrar el CMD, fueron seleccionados para los primeros 0,30m del perfil, por su sensibilidad para distinguir usos de suelo, los siguientes atributos químicos: pH, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo extractable, potasio; calcio, magnesio; hidrógeno y aluminio intercambiables.

No fue incluida la capacidad del suelo para intercambiar cationes (T), porque su valor es el resultado de la suma de las bases y la acidez cambiables, quedando entonces, perfectamente representada por los cationes Ca, Mg, K, H y Al, cambiables que sí fueron incluidos en el CMD.

3.4.5 INDICADORES BIOLÓGICOS:

En base a los coeficientes de correlación de cada variable biológica respecto a los componentes, se construyeron círculos de correlaciones, para cada profundidad evaluada. En la nube de variables (Fig. 3.13), se puede observar que en superficie, la componente 1 estuvo correlacionada positivamente con los atributos: materia orgánica particulada y sus fracciones, actividad enzimática de la fosfatasa ácida y nitrógeno potencialmente mineralizable. En tanto que la componente 2, sólo se relacionó con la respiración de suelo.

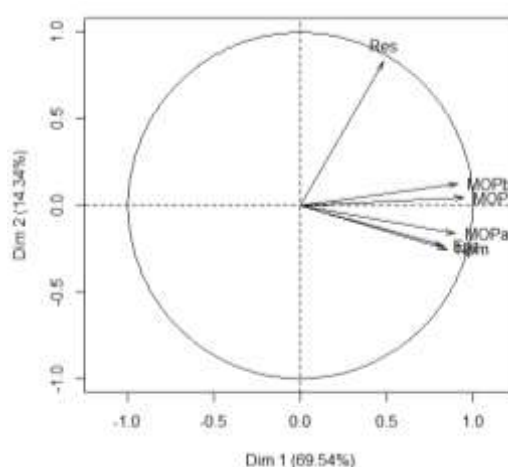


Figura 3.13: Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0-0,10m.

Articulando las figuras 3.13 y 3.14, se puede ver que los suelos sin disturbar se ubicaron mayoritariamente sobre la derecha del plano, presentando los mayores contenidos de material orgánico particulado en sus distintas fracciones (MOPa, MOPb y MOP) y mayor actividad enzimática.

A la izquierda, se ubicaron los suelos bajo usos yerbatero y tabacalero, presentando valores por debajo de la media. Los individuos correspondientes al tratamiento citrus, tuvieron una posición intermedia entre selva y los otros dos usos agrícolas.

Respecto a la CP2, los suelos de todos los tratamientos evaluados, se ubicaron tanto en el plano superior como en el inferior, no permitiendo establecer diferencias entre usos.

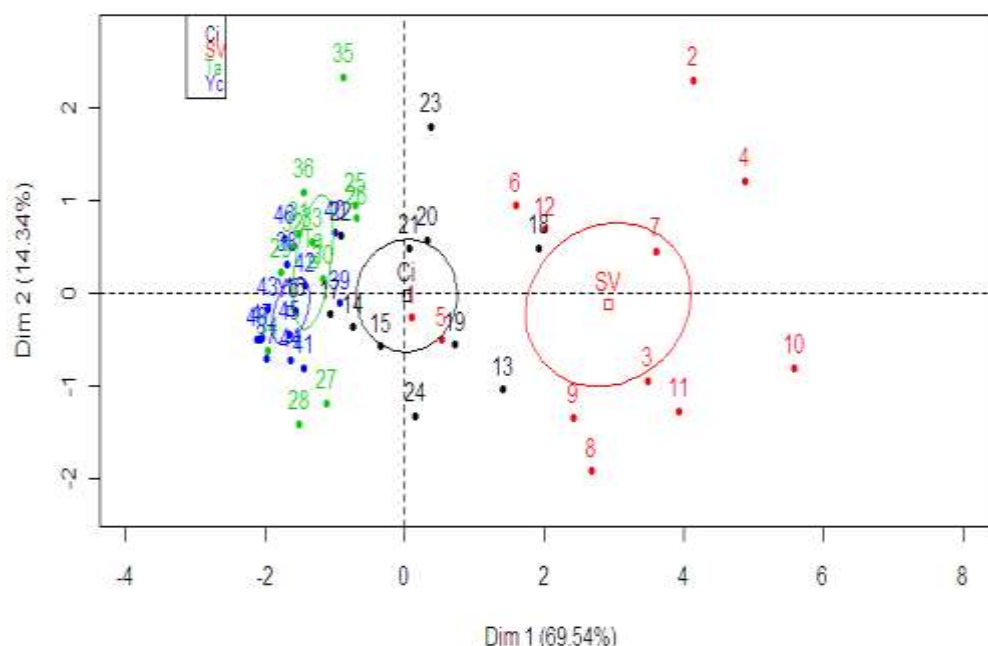


Figura 3.14: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables biológicas de 0-0,10 m: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

Para la segunda profundidad evaluada, se observa que la primera componente se correlacionó positivamente con la materia orgánica particulada y sus fracciones, en tanto que la CP2 lo hizo con la actividad enzimática (Fig. 3.15), estando el nitrógeno potencial correlacionado con ambas componentes.

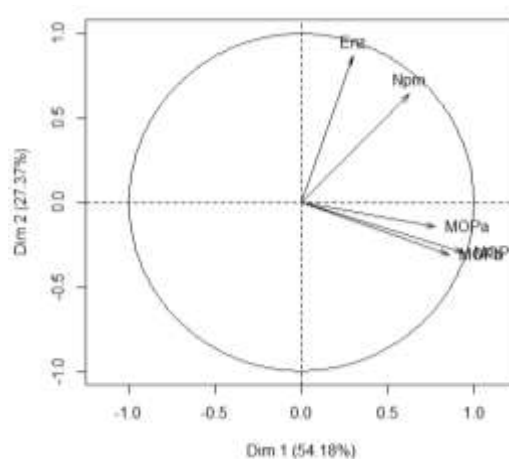


Figura 3.15: Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,10-0,20 m.

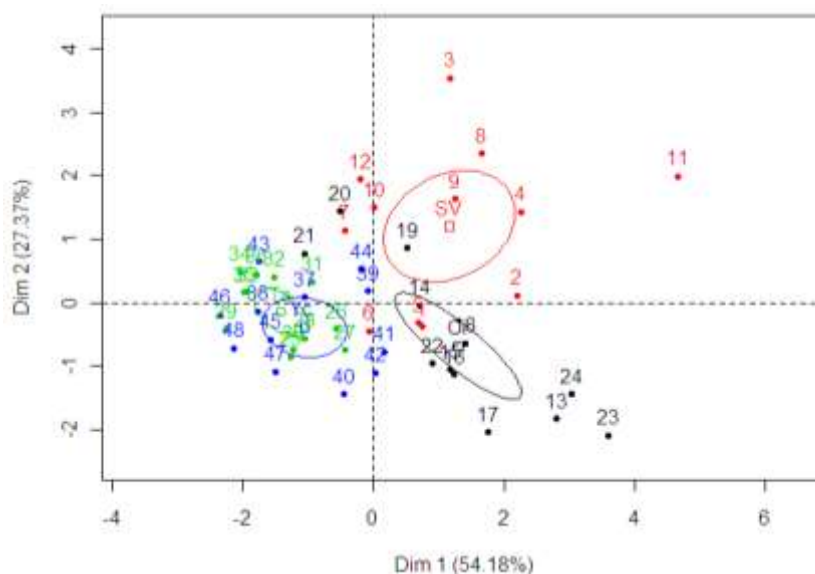


Figura 3.16: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables biológicas de 0,10-0,20 m: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

Superponiendo la información otorgada por las Fig. 3.15 y 3.16, se puede observar que los suelos bajo selva presentaron una mayor actividad biológica (enzimática y de mineralización) que los suelos con yerba mate y tabaco, presentando el uso citrícola una situación intermedia entre éstos y selva.

Para la siguiente profundidad evaluada (0,20-0,30m), el círculo de correlación y la distribución de los individuos (Figs. 3.17 y 3.18), presentaron similares características a la anterior profundidad.

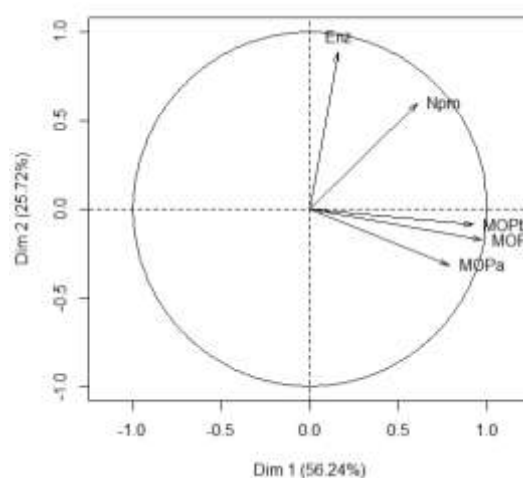


Figura 3.17: Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes ó dimensiones (Dim) 1 y 2 construidas para la profundidad de 0,20-0,30 m.

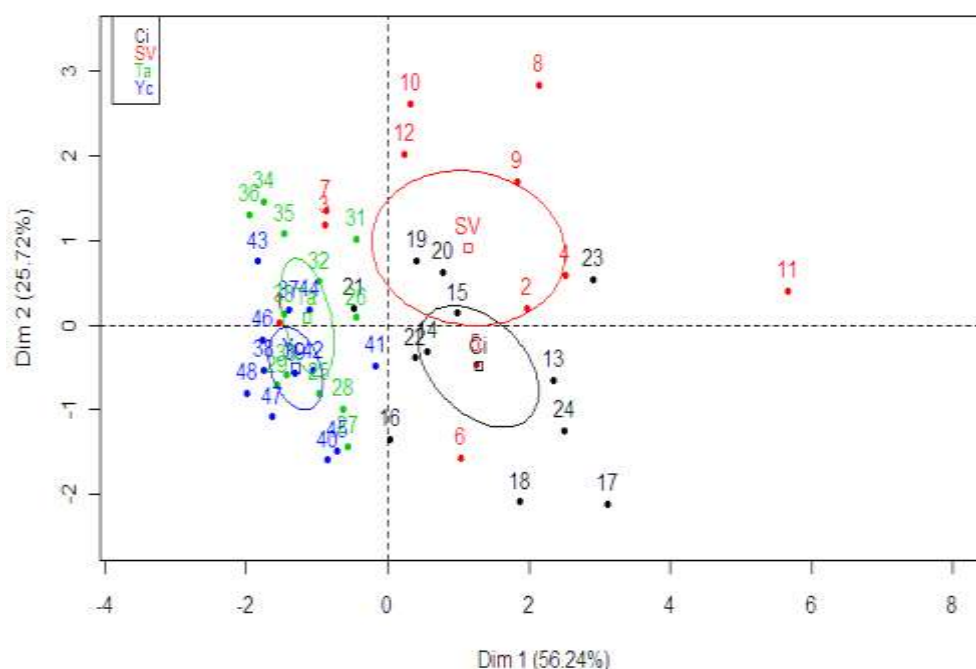


Figura 3.18: Gráfico de *Bi-plot* correspondiente al ACP de variables biológicas de 0,20-0,30 m: elipses de confianza al 95%, rodeando las categorías de usos del suelo sobre el plano principal producido por las componentes 1 y 2. Suelos bajo selva (rojo), bajo cultivo de yerba mate (azul), bajo cultivo de tabaco (verde) y bajo cultivo de citrus (negro).

La CP1 estuvo asociada a las fracciones orgánicas particuladas y al nitrógeno potencialmente mineralizable, en tanto que la CP2 lo hizo respecto a la actividad enzimática.

La visualización de los datos permitió observar que considerando los primeros 0,30 m del perfil, los suelos prístinos presentaron una mayor capacidad para mineralizar nitrógeno y una mayor actividad de la fosfatasa ácida. Los suelos bajo citrus presentaron mayor MOP y Npm que los suelos bajo Ta y Yc, atribuible a que en éstos dos últimos el producto de la cosecha son hojas por lo tanto el material vegetal que regresa al suelo como residuo, es menor que en citrus.

Los resultados del ANOVA, para evaluar la sensibilidad de las propiedades biológicas para distinguir entre usos de suelo, se pueden observar en la Tabla 3.3.

Los coeficientes de variación de MOP y Npm fueron elevados pero resultaron propios a lo esperado para estos atributos como ya ha sido encontrado por

Dalurzo (2002) y Tang & Baldocchi (2005). El coeficiente de variación de la RES fue > al 35%, similar a lo hallado por otros autores (De Jong, 1981; Rochette *et al.*, 1991), dada la gran variabilidad que posee dicho parámetro.

Tabla 3.3: Resultados del análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$) para las variables biológicas evaluadas para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m (1); 0,10-0,20 m (2) y 0,20-0,30 m (3), en los sistemas correspondientes a la Etapa I: selva (Sv), citrus (Ci), tabaco (Ta) y yerba mate (Yc). Medias, coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p-valor).

Propiedades Biológicas								
	Prof.	Sv	Ci	Ta	Yc	R ²	CV	p-valor
MOPa g.Kg ⁻¹	1	4,19a	2,67b	1,34c	1,32c	0,54	44,75	<0,0001
	2	1,46a	1,32a	0,82b	1,17ab	0,20	41,07	0,0171
	3	1,12a	1,09a	0,74b	0,87ab	0,16	39,22	0,0503
MOPb g.Kg ⁻¹	1	9,60a	6,36b	2,49c	1,96c	0,64	47,85	<0,0001
	2	2,53b	3,88a	1,51c	1,40c	0,59	36,90	<0,0001
	3	2,03b	2,60a	1,24c	0,98c	0,53	36,95	<0,0001
MOP g.Kg ⁻¹	1	13,80a	9,03b	3,83c	3,28c	0,67	41,84	<0,0001
	2	4,00b	5,20a	2,34c	2,57c	0,52	33,07	<0,0001
	3	3,15a	3,69a	1,99b	1,84b	0,46	33,29	<0,0001
Npm g.Kg ⁻¹	1	0,20a	0,06b	0,04b	0,03b	0,71	51,93	<0,0001
	2	0,15a	0,06b	0,02c	0,03bc	0,69	49,57	<0,0001
	3	0,08a	0,05b	0,01c	0,01c	0,69	45,34	<0,0001
Enz μg p-nitrof. g ⁻¹ soil h ⁻¹	1	698,24a	270,23b	275,53b	251,97b	0,66	37,92	<0,0001
	2	281,65a	221,62b	207,72b	184,26b	0,28	26,68	0,0020
	3	192,26a	147,00b	176,71ab	144,71b	0,19	25,96	0,0227
Res kgCO ₂ .ha ⁻¹ d ⁻¹	1	47,32a	33,38b	38,31ab	29,26b	0,20	37,40	0,0171

MOP: Materia orgánica particulada de 2 a 0,053mm, MOPa: MOP de 2 a 0,5mm; MOPb: MOP de 0,5 a 0,053 mm; Npm: nitrógeno potencialmente mineralizable; Enz: actividad de fosfatasa ácida; Res: respiración de suelo.

Tanto en suelos vírgenes como en cultivados, los mayores valores de materia orgánica particulada total y de sus fracciones, se presentaron en superficie, lo cual fue atribuido a una mayor cantidad de material aportado (hojarasca y/o residuos) en los primeros centímetros del perfil que favoreció la acumulación de material orgánico principalmente del particulado (Eiza *et al.*, 2005).

La MOP presentó diferencias significativas entre suelos sin disturbar y disturbados en las 3 profundidades, correspondiendo los mayores valores a los

suelos prístinos, y dentro de los cultivados a los suelos bajo citrus. Este material joven y activo del suelo, fue sensible al uso, resultando menor en los sistemas agrícolas, ya que al cultivar los suelos, la rápida disminución de la MO es atribuible a la pérdida de estas fracciones (Dalurzo *et al.*, 2005; Amado *et al.*, 2006; Galantini & Suñer, 2008). Las pérdidas de MOP para Yc y Ta se produjeron en las 3 profundidades y fueron para los primeros 0,30 m del perfil del 61 al 63%. En tanto que para citrus, sólo ocurrieron en los primeros 0,10m y fueron del orden del 35%. Las mayores pérdidas en suelos bajo yerba mate y tabaco, fueron atribuidas a que en ambos cultivos el producto de cosecha son las hojas, por cuanto la biomasa aérea que pudo volver al suelo fue menor que en citrus, donde el producto de cosecha son los frutos. La acumulación o no de C orgánico “joven”, en respuesta a los cambios en las prácticas de manejo se atribuye principalmente a las diferencias en acumulación de materiales orgánicos lábiles parcialmente descompuestos y/o a las tasas de descomposición (Janzen *et al.*, 1998) y tiene incidencia sobre el ambiente físico y químico-bioquímico del suelo (Cambardella & Elliot, 1992).

Los suelos agrícolas presentaron un menor potencial para mineralizar nitrógeno, coincidiendo con lo encontrado por autores como Videla *et al.* (2005), Deenik (2006) y Valles de la Mora *et al.* (2008). La menor mineralización del nitrógeno observada en suelos cultivados, indica una menor actividad microbiana y una degradación de las propiedades biológicas del suelo (Deenik, 2006).

La actividad de la fosfatasa ácida y la tasa de respiración del suelo disminuyeron con el uso agrícola, señalando una menor actividad biológica respecto al suelo climax. El incremento de la población microbiana trae consigo un incremento en el CO₂, y éste puede ser usado como índice de la actividad biológica del suelo (Macfadyen, 1970; Anderson & Domsch, 1975). La mayor actividad biológica en suelos bajo selva, sería atribuible a una mayor cantidad de sustratos disponibles para la flora y fauna del suelo (Dalurzo *et al.*, 2005) y al gran número de raíces

presentes en los primeros 10 cm que incrementaría la secreción de dicha enzima, como fuera informado por Ozawa *et al.* (1995).

Todas las propiedades biológicas evaluadas presentaron diferencias significativas entre usos del suelo ($p < 0,05$), por lo que fueron incluidas en el CMD para futuros análisis y la obtención de índices de calidad.

3.5 CONCLUSIONES

- La visualización multivariada de datos, posibilitó establecer para cada profundidad las relaciones entre variables, distinguir los usos de suelo y conocer los atributos que presentaron un mayor potencial como indicadores de calidad.
- El conjunto mínimo de datos (CMD) para cada categoría de variables, en los primeros 0,30 m del perfil, quedó conformado por:

-CMD de orden físico: densidad aparente (Da), espacio aéreo (Eae), estabilidad de agregados (EA), humedad equivalente (HE), resistencia a la penetración (RP) e infiltración básica (Ib).

-CMD de orden químico: pH, carbono orgánico (CO), nitrógeno total (N), fósforo asimilable (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hidrógeno (H) y aluminio (Al) intercambiables.

-CMD de orden biológico: materia orgánica particulada de 2 a 0,053 mm (MOP), materia orgánica particulada gruesa de 2 a 0,5 mm (MOPa), materia orgánica particulada fina de 0,5 a 0,053 mm (MOPb), nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm), actividad de las enzimas fosfatasas ácidas (Enz) y respiración del suelo (Res).

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE ÍNDICES DE CALIDAD

4.1 INTRODUCCIÓN:

El establecimiento de índices es considerado de crucial importancia en la determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008), para asegurar la promoción de prácticas de manejo y sistemas de cultivo que favorezcan la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas (Torres *et al.*, 2006).

A partir de los indicadores de calidad (IC) determinados, es necesario desarrollar índices estableciendo valores que permitan cuantificar la calidad del suelo (CS) (Ebert & Welch, 2004), a los efectos de contar con herramientas que sean útiles para evaluar el efecto del uso del suelo en áreas subtropicales, y prevenir la degradación de los mismos.

Un índice de calidad puede ser definido como el mínimo conjunto de parámetros, que interrelacionados, proveen datos numéricos acerca de la capacidad de un suelo para llevar a cabo sus funciones (Acton & Padbury, 1993). Las variables que integran un índice de calidad son consideradas como los indicadores más críticos para expresar la calidad del suelo (Sinha *et al.*, 2009).

Una de las técnicas más usadas para la construcción de índices, consiste en la ponderación y transformación de los indicadores de calidad y su combinación en un índice (Andrew *et al.*, 2002; Bastida *et al.*, 2006) ó también a partir de regresiones lineales múltiples, donde una variable es calculada por la combinación lineal de otras (Trasar-Cepeda *et al.*, 1998; Zornoza *et al.*, 2008).

Diversos autores como Wander & Bollero (1999); Giuffré *et al.*, (2006); Shukla *et al.*, (2006); Xu *et al.*, (2006); Villamil *et al.*, (2008); Almenara-Barrios (2008) y Santana Rodríguez *et al.* (2010), han efectuado trabajos en IC en los cuales han aplicado técnicas de análisis multivariante como análisis de componentes principales, factor de análisis ó su combinación con un análisis discriminante, a los efectos de determinar cuáles son los indicadores de suelo que permiten

diferenciar mejor las distintas categorías de manejo de suelo o sistemas de cultivo.

Dada la cantidad y multidimensionalidad de las variables que intervienen en un agro-ecosistema y dentro de éste en el sistema suelo, resulta necesario que esa información caracterizada por su complejidad y multidimensión, sea simplificada y condensada en valores claros, objetivos y generales obtenidos en base a la información brindada por los indicadores de calidad (IC), por lo que se recurrió a la aplicación de técnicas multivariadas, como el análisis de componentes principales (ACP).

Debido a que muchas de las propiedades edáficas que contribuyen a explicar la calidad del suelo se encuentran altamente correlacionadas, es necesario llevar a cabo una evaluación mediante métodos estadísticos que consideren todas las variables simultáneamente y la correlación entre ellas (Bredja *et al.*, 2000). El análisis multivariado de componentes principales construye nuevas variables no correlacionadas o componentes principales basándose en la matriz de correlación. Permite así analizar la interdependencia de variables y encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos (Bi-plot), donde pueden visualizarse tanto tratamientos como variables, a fin de estudiar la asociación existente entre ellas.

Como las componentes son combinaciones lineales de todas las variables originales, la selección de variables dentro de cada componente, puede ser deseable cuando el objetivo es seleccionar atributos para ser considerados o medidos en futuros estudios (Argüelles-Cárdenas, 1990; McCabe, 1984) como es el caso del desarrollo de índices (Abeyasekera, 1995).

4.2 OBJETIVO

Desarrollar índices de calidad a partir de funciones matemáticas sintetizadoras, que resuman información compleja sobre el estado del sistema suelo, a fin de cuantificar la calidad de los suelos y monitorear su dinámica bajo distintos sistemas de uso.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS:

Se utilizó el set de datos correspondiente a las propiedades físicas, químicas y biológicas obtenidos durante el desarrollo del Proyecto “Dinámica del fósforo en Oxisoles bajo distintos sistemas de uso”, para los sistemas selva subtropical (Sv), cultivo de citrus (Ci), cultivo de tabaco (Ta) y cultivo de yerba mate (Yc), descrito en Cap. 2. El suelo bajo svirgen, fue tomado como referencia de alta calidad, ya que en ecosistemas naturales, no disturbados, el funcionamiento del sistema suelo se encuentra expresado en su máximo potencial (Arshad & Martin 2002; Masto *et al.*, 2008).

A partir del conjunto mínimo de datos (CMD), obtenidos para cada categoría de variables (físicas, químicas y biológicas), se procedió al desarrollo de índices de calidad mediante la aplicación de Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica que permitió concentrar toda la variación presente en la matriz de datos originales en unos pocos ejes o componentes principales (CP). Cada componente fue el resultado de una combinación lineal de las variables originales, en donde cada una tuvo una ponderación diferente, en proporción a las magnitudes de cada elemento que conforma el autovector respectivo. El significado de cada CP, depende de la magnitud de tales ponderaciones y de su signo, y es necesario encontrarle sentido desde un punto de vista técnico (Quevedo, 1991).

La contribución de los indicadores en cada CP, se expresó en autovalores y autovectores. Los autovalores o valores propios correspondientes a cada una, hacen referencia a la proporción de la variabilidad total explicada por cada componente, y a la proporción de la variabilidad total explicada, en forma acumulada. Los autovectores o vectores propios, son los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar las CP y permiten ver la incidencia que tuvo cada variable en la definición de los ejes (Franco & Hidalgo, 2003).

Es deseable que un pequeño número de componentes explique un gran porcentaje de la varianza total, es decir que el conjunto de datos pueda ser descripto en un menor espacio dimensional (Manly, 1997).

A partir de los CMD físicos, químicos y biológicos obtenidos (Cap. 3), y considerando las 3 profundidades juntas (0,30 m), se efectuaron tres análisis de componentes principales normados a partir de la matriz de correlación. Se trabajó con los datos estandarizados (media=0 y variancia=1) a fin de que todas las variables originales tengan igual importancia, ya que las mismas no fueron medidas en iguales unidades (Manly, 1997; Husson *et al.*, 2011).

4.3.1 Número de componentes principales a considerar:

Las componentes (CP's) a evaluar para la construcción de los índices, fueron seleccionadas de forma de preservar la mayor parte de la variación original, en base a autovalores mayores a 1 (Johnson, 2000; Tusell, 2008; Husson *et al.*, 2011), debido a que, con datos estandarizados cuando una CP posee un autovalor mayor a 1, significa que explica mayor proporción de la variabilidad de los datos que las variables individuales (Bredja *et al.*, 2000). Se consideraron también los gráficos de codo, de precipicio, sedimentación ó "Scree plot" propuestos por Cattell (1966) Cit. Jackson (2003), quien sugirió representar el número de componentes y su valor propio lo que permite observar en forma gráfica el decrecimiento de los primeros componentes en relación con los demás (Jhonson & Wichern, 2007). La idea es buscar un "codo" en el gráfico, es decir, un punto a partir del cual los autovalores sean aproximadamente iguales, siendo el criterio de selección "quedarse con un número de componentes que excluya los asociados a valores pequeños y aproximadamente del mismo tamaño" (Peña, 2002; Jhonson & Wichern, 2007).

4.3.2 Selección de indicadores dentro de cada componente principal:

Una vez obtenidas las CP's, se procedió a seleccionar dentro de cada una, las variables o atributos de calidad para la conformación de los índices. Se

consideraron aquellas variables con contribución significativa en la construcción cada componente principal.

En base a lo sugerido por Ferreira (1987) Cit. Franco & Hidalgo (2003), las cargas que se distribuyen en las componentes indican el peso de cada variable asociada ó el grado de contribución a la CP. En cada componente, se seleccionaron las variables cuyos autovectores presentaron altas cargas (cargas $>2/3$ de la carga máxima) y alta correlación (Bramardi, 2009).

Frente al caso de 1 variable con alta carga en dos componentes a la vez, el criterio de selección que se tomó fue conservar la variable en la componente con la que presenta mayor correlación positiva (Husson *et al.*, 2011).

Cada CP resultó entonces una variable sintética o combinación lineal de las variables originales que resumió la información, y fue interpretada como un índice de calidad (Godshalk & Timothy, 1988; Almenara-Barrios *et al.*, 2002; Tusell, 2008; Santana Rodríguez *et al.*, 2010).

Se utilizó el paquete FactoMineR, específico del programa estadístico R, a fin de obtener elipses de confianza al 95% en los gráficos de dispersión de individuos, determinando si las nuevas variables generadas, no correlacionadas (CP) pudieron separar entre los distintos usos de suelo.

Las elipses, adaptadas al plano de representación, posibilitan visualizar o no categorías o grupos con diferencias estadísticas significativas (Husson *et al.*, 2011). Si las elipses de confianza no se interceptan, significa que hay diferencias entre los grupos en las variables estudiadas simultáneamente.

4.3.3 Construcción de índices de calidad y puntuaciones: un factor o componente, es la combinación lineal, la suma algebraica, de las variables que mejor lo definen (Morales Vallejo, 2013), de manera que a partir de los ACP, a través de las selecciones de las CP's y de las variables según criterios arriba descriptos, se construyeron índices de calidad física, química y biológica.

Las puntuaciones de los índices se calcularon para los distintos sistemas bajo estudio, de manera directa, ya que las mismas fueron valoradas a partir de los datos estandarizados de las variables que intervinieron en su construcción y de la aplicación de la formulación correspondiente (Morales Vallejo, 2013).

Para la obtención de índices de calidad física, se consideró un CMD compuesto por 6 variables físicas que resultaron sensibles al cambio en el uso del suelo. Las mismas fueron: densidad aparente (Da), estabilidad de agregados (EA), espacio aéreo (Eae), infiltración básica (Ib), humedad equivalente (HE) y resistencia mecánica a la penetración (RP) (Cap. 3).

Para la obtención de índices de calidad química, se consideró un CMD compuesto por 10 indicadores: pH, carbono orgánico (CO), nitrógeno total (N), fósforo asimilable (P), las bases intercambiables: potasio, calcio, magnesio, hidrógeno (H) y aluminio (Al) intercambiable (Cap. 3).

Para la obtención de índices de calidad biológica, se consideraron las variables que resultaron sensibles al cambio en el uso del suelo en al menos 1 de las 3 profundidades en las que fueron determinadas (Tabla 1, Capítulo IV). Dentro de la categoría fueron incluídas la materia orgánica particulada y el nitrógeno potencialmente mineralizable, conforme al agrupamiento efectuado por autores como Wander & Bollero (1999) y Karlen *et al.* (2001).

Las variables que integraron la categoría fueron: materia orgánica particulada total (MOP), materia orgánica particulada fracción gruesa (MOPa), materia orgánica particulada fracción fina (MOPb), nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm), respiración de suelo (Res) y actividad de la enzímica de la fosfatasa ácida (Enz).

4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

4.5.1 ÍNDICES DE CALIDAD FÍSICA

A partir del análisis de componentes principales normado considerando los primeros 0,30 m del perfil de suelo, se obtuvieron en total, 5 componentes principales (CP) ó dimensiones (Tabla 4.1).

La componente principal 1 (CP1), explicó la mayor variabilidad de las propiedades físicas (56%), la CP2 un 20% y juntas explicaron una variancia acumulada del 77%.

Tabla 4.1: Descomposición de la variabilidad por componente principal (CP) para las variables físicas en los primeros 0,30 m del perfil de suelo.

CP	1	2	3	4	5
Autovalor	2,799	1,046	0,638	0,460	0,055
Diferencia	1,753	0,407	0,178	0,404	0,000
Proporción	0,560	0,209	0,127	0,092	0,011
Acumulada	0,560	0,769	0,896	0,988	1,000

4.4.1.1 Selección del número de componentes: las CP's fueron seleccionadas en base a la contribución de los autovalores (>1) respecto a la variancia total y examinando los gráficos de codo ó scree plots (Fig. 4.1). Se buscó en el gráfico el "codo" o punto a partir del cual los valores propios tomaron valores bajos, dejando un número de componentes que excluye los asociados a valores pequeños y aproximadamente del mismo tamaño.

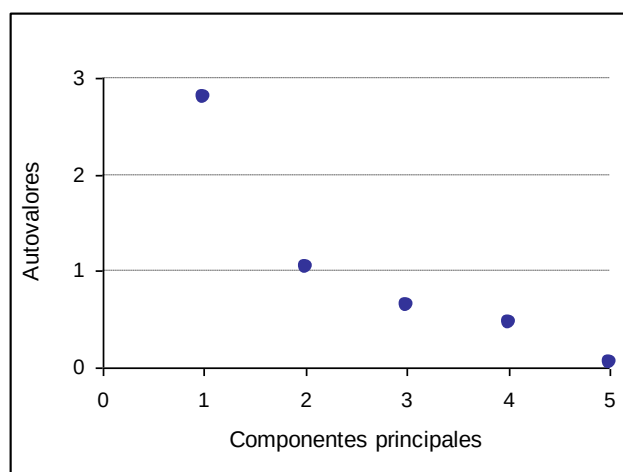


Figura 4.1: Gráfico de codo ó scree plot para las propiedades físicas de 0-0,30 m.

Se conservaron así las dos primeras componentes, ya que a partir de la segunda componente se presentó una caída en la capacidad predictiva, con autovalores <1 .

4.4.1.2 Selección de atributos de calidad dentro de cada componente

principal: se consideraron con contribución significativa a cada componente principal, aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas $>2/3$ carga máxima y una alta correlación con las componentes (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Autovectores de las componentes principales CP1 y CP2 para las variables físicas. Se señalan con negrita a la carga máxima y con * a las variables cuyos autovectores presentaron cargas $>2/3$ de la carga máxima.

Variable	CP1	CP2
Da	-0,57	-0,00
EA	0,41*	-0,18
Eae	0,54*	-0,01
HE	0,44*	0,28
RP	-0,43	0,94
Ib	0,40	-0,27

Las variables con mayor participación en la construcción de la primera componente fueron: densidad aparente (Da), espacio aéreo (Eae), humedad equivalente (HE), estabilidad de agregados (EA) e infiltración básica (Ib). Las mismas presentaron una alta correlación con la componente (Tabla 4.3), por cuanto fueron seleccionadas para conformar un índice de calidad.

Para la segunda dimensión ó CP, la variable con mayor contribución fue la resistencia mecánica a la penetración (RP), la cual presentó una correlación positiva y significativa con la misma, y fue seleccionada para conformar un segundo índice de calidad física.

Tabla 4.3: Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre las variables físicas y las componentes principales, para la profundidad de 0 a 0,30m. N=144. Prob>r, bajo H0: Rho=0

	Da	Eae	EA	HE	RP	Ib
CP 1	-0,96	0,90	0,70	0,73	-0,07	0,71
Pr	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,38	<0,0001
CP 2	-0,00	-0,01	-0,18	0,29	0,96	-0,20
Pr	0,992	0,853	0,025	0,0004	<0,0001	0,157

4.4.1.3 Construcción de índices de calidad física: cada componente fue tratada como una nueva variable aleatoria, la primera componente fue etiquetada como “Agregación del suelo” y la segunda como “Resistencia mecánica”.

A partir de las CP1 y CP2 obtenidos por ACP, y de los indicadores seleccionados en cada una, se obtuvieron las siguientes formulaciones:

$$\blacksquare \quad Y1 = Eae*0,54 + HE*0,44 + EA*0,41 + Ib*0,40 - Da*0,57$$

a la cual se denominó índice **IF-30-1** ó “Índice de agregación” y, también

$$\blacksquare \quad Y2 = RP*0,92$$

a la que se denominó índice **IF-30-2** ó “Índice de resistencia mecánica”.

Como se puede observar, el índice de agregación, hace referencia a la estructura, a su estabilidad, y a la relación aire- agua del suelo.

Por lo expuesto, el índice IF-30-1, tomará valores mayores cuanto mayor sea el espacio poroso ocupado por aire, la capacidad del suelo para retener agua, la estabilidad de los agregados, la entrada de agua al suelo y cuanto menor sea la densidad aparente del mismo. Así valores altos del índice “Agregación del suelo”, deberían corresponder a suelos de alta calidad (selva subtropical).

El índice IF-30-2, depende únicamente de la variable resistencia mecánica a la penetración, por cuanto tomará mayores valores cuanto mayor sea la compactación del suelo, por ende es de esperar que los menores valores de este índice correspondan a suelos de alta calidad.

En la Figura 4.2, se puede observar el grado de asociación entre las variables, el cual que está determinado por la separación angular que forman sus proyecciones. La mayor asociación estuvo dada entre la estabilidad de agregados, el espacio aéreo y la humedad equivalente.

Superponiendo la información otorgada por el círculo de correlaciones (Fig. 4.2) y el bi-plot de individuos y elipses de confianza (Fig. 4.3), se puede observar que la CP1 logró diferenciar los 4 sistemas bajo estudio, ubicándose a la derecha del plano los suelos de mayor calidad (selva) y a la izquierda los suelos bajo usos tabacalero y citrícola, los cuales presentaron mayor densificación, menor espacio aéreo, menor capacidad para retener agua, menor estabilidad de agregados y por tanto, menor calidad ubicándose los suelos bajo yerba entre éstos y los suelos de alta calidad.

En tanto que, la CP2 no logró diferenciar entre usos.

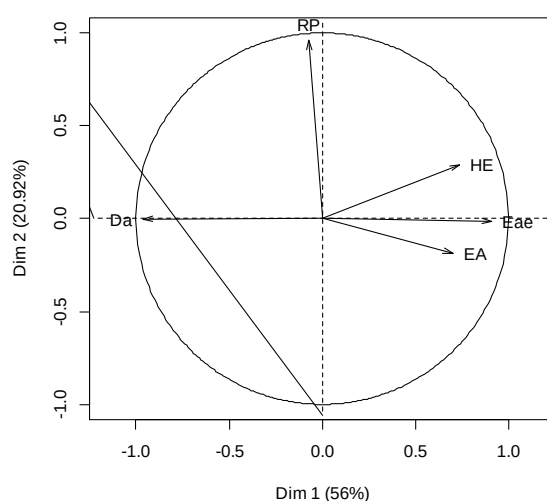


Figura 4.2. Visualización de los coeficientes de correlación entre variables físicas y las CP1 y CP2

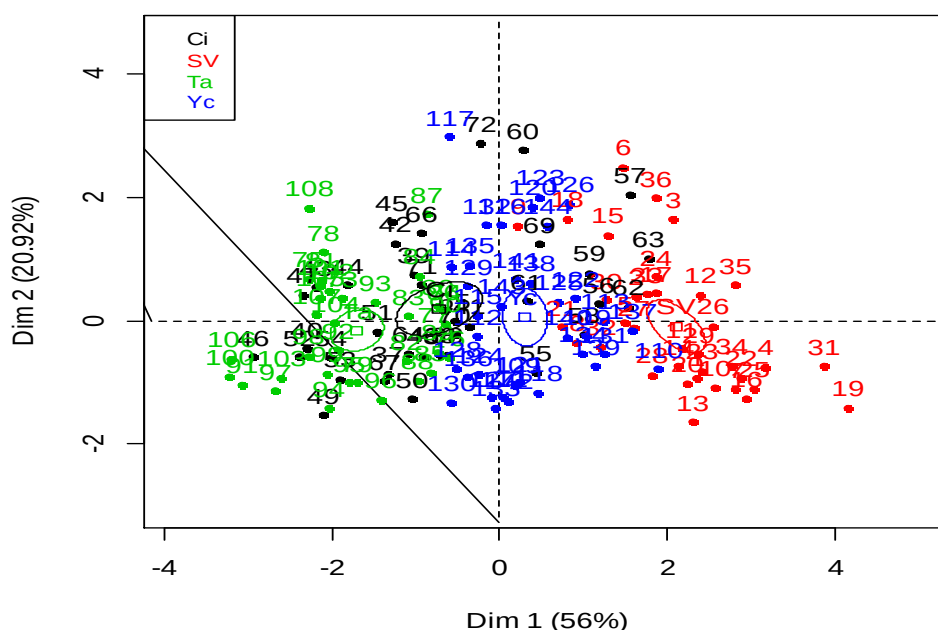


Figura 4.3: Gráfico *bi -plot* correspondiente al ACP de las propiedades físicas: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes ó dimensiones 1 y 2.

4.4.1.4 Puntuaciones de los índices de calidad física para los distintos usos de suelo:

Las puntuaciones de los índices bajo los distintos sistemas de uso (Tabla 4.4), fueron calculadas aplicando las formulaciones obtenidas de las CP's, a los valores de las variables previamente estandarizados.

Tabla 4.4: Puntuaciones o “scores” para los índices de calidad física del suelo, bajo los sistemas selva (Sv), citrus (Ci), yerba mate (Yc) y tabaco (Ta). Anova y Prueba LSD ($p < 0,05$).

IF-30-1 “Agregación”		IF-30-2 “Resistencia M.”	
Sistema		Sistema	
Sv	2,26a	Ci	0,32a
Yc	0,22b	Yc	0,08ab
Ci	-0,77c	Ta	-0,14b
Ta	-1,71d	Sv	-0,26b
<i>p-valor</i>	0,0001	<i>p-valor</i>	0,042

El índice de agregación, resultó sensible y permitió diferenciar estadísticamente los 4 sistemas de uso, estableciendo el siguiente orden de calidad Sv>Yc>Ci>Ta.

El uso agrícola favoreció la densificación del suelo, afectando la agregación, disminuyendo la macroporosidad, la infiltración y la capacidad del suelo para retener agua, es decir produjo pérdida de calidad del suelo. Operaciones tales como la siembra, las labores culturales, la fertilización, el control de malezas y plagas, la cosecha, conllevan a una compactación del suelo (FAO, 1997).

La mayor pérdida de calidad física correspondió al uso tabacalero, lo cual fue atribuido a la labranza convencional, ya que la remoción de suelo favorece la destrucción de los agregados y la pérdida de materia orgánica (Galantini & Rosell, 1997; Six *et al.*, 1998) y aumenta la densidad aparente del suelo (Carvalho *et al.*, 2009).

El índice de resistencia mecánica, resultó menos sensible e indicó al suelo bajo cultivo perenne (citrus) como el de mayor dureza, con la mayor resistencia a la penetración, lo cual se asoció a la no remoción de suelo, y al tránsito y peso de tractores y acoplados utilizados durante la cosecha, como así también a las desmalezadoras empleadas durante el control mecánico. La relación entre proliferación y desarrollo de raíces, y la resistencia mecánica del suelo, ha sido bien establecida (Schoenholtz *et al.*, 2000); siendo el tráfico vehicular la principal fuente de compactación, causante de una disminución del espacio poroso, una menor capacidad para retener agua, y una mayor impedancia para la penetración y desarrollo de las raíces (Jorajuría, 1996; Powers *et al.*, 1998).

4.5.2 ÍNDICES DE CALIDAD QUÍMICA

A partir del análisis de componentes principales, se obtuvieron en total, 9 componentes principales (CP) ó dimensiones, de las cuales se presentan sólo las primeras 5 (Tabla 4.5).

Puede observarse que la CP1 explicó un 48 % de la variabilidad de los parámetros químicos, la CP2 un 19%, la CP3 un 14% y las CP's 4 y 5 explicaron cada una menos del 10 % de la variabilidad total.

Tabla 4.5: Primeras 5 componentes principales obtenidas para las 9 variables químicas evaluadas en los 0,30 m del perfil de suelo, sus autovalores, proporción de variancia explicada y variancia acumulada.

CP	1	2	3	4	5
Autovalor	4,395	1,718	1,258	0,600	0,395
Diferencia	2,676	0,460	0,657	0,205	0,060
Proporción	0,488	0,190	0,139	0,066	0,043
Acumulada	0,488	0,679	0,819	0,885	0,929

4.4.2.1 Selección del número de componentes:

Las CP's fueron seleccionadas en base a la contribución de los autovalores (>1) respecto a la variancia total y examinando el gráfico de codo ó scree plot (Fig.4.4).

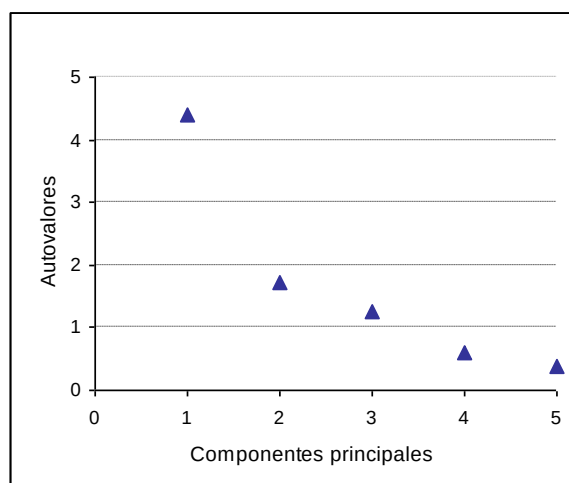


Figura 4.4: Gráfico de codo o Scree plot de las propiedades químicas de 0-0,30m.

Como puede observarse que a partir de la tercera componente, ocurrió una caída en la capacidad predictiva, presentándose autovalores inferiores a 1, por cuanto se seleccionaron las 3 primeras componentes principales para la construcción de los índices. Las mismas explicaron un 82% de la variabilidad total (Tabla 4.5).

4.4.2.2 Selección de atributos de calidad dentro de cada componente principal:

Se consideraron con contribución significativa a cada componente principal, aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas $>2/3$ de la carga máxima y una alta correlación con las componentes (Tabla 4.6).

Tabla 4.6: Autovectores de las 3 componentes seleccionadas para las variables químicas. Se señalan con negrita a la carga máxima y con *, a aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas $>2/3$ de la carga máxima.

Variable	CP1	CP2	CP3
pH	-0,35*	-0,24	-0,25
CO	0,32*	0,50	0,02
N	0,35*	0,46*	-0,09
P	0,14	0,18	0,75
K	0,30*	-0,11	0,47
Ca	0,43	0,04	-0,23
Mg	0,32*	0,16	-0,25
H	-0,32*	0,47*	-0,06
Al	0,36*	0,41*	-0,07

Se presentaron casos en los que una misma variable presentó alta carga en 2 componentes a la vez (CO, N, H y Al), por lo cual se procedió a consultar la tabla de correlaciones de las variables con las componentes (Tabla 4.7), conservando la variable en aquella componente con la cual presentó mayor correlación positiva.

En el caso de CO y N ambas presentaron cargas altas y positivas en las CP1 y 2; por otro lado el H y el Al presentaron altas cargas en las CP 1 y 2, pero con diferentes signos (negativo con la CP1 y positivo con la CP2), esto según Nunally (1978) Cit. Morales Vallejo (2013), sugiere que las variables CO y N por una parte, e H y Al por otra, son variables que se encuentran altamente correlacionadas entre ellas.

Tabla 4.7. Correlaciones entre las variables químicas y las componentes principales, para la profundidad de 0 a 0,30 m. N=144. Prob>r, bajo H₀: Rho=0

	CP 1	Pr	CP 2	Pr
pH	0,749	<0,0001	-0,321	<0,0001
CO	0,678	<0,0001	0,657	<0,0001
N	0,739	<0,0001	0,603	<0,0001
P	0,294	0,0003	0,244	0,0032
K	0,643	<0,0001	-0,146	0,0805
Ca	0,907	<0,0001	0,062	0,4547
Mg	0,683	<0,0001	0,219	0,0084
H	-0,68	<0,0001	0,625	<0,0001
Al	-0,75	<0,0001	0,542	<0,0001

Para la primera dimensión, las variables seleccionadas fueron: pH, carbono orgánico, nitrógeno total, potasio, calcio y magnesio intercambiables. Cabe destacar que si bien CO y N, son variables que presentan una alta correlación entre ellas, se conservaron ambas en el CMD debido a que, en sistemas que reciben fertilizaciones nitrogenadas (tabaco, citrus) el N proviene no solamente de la mineralización de los compuestos orgánicos sino también de los minerales nitrogenados aportados; a su vez la materia orgánica es considerada un indicador universal debido a su gran influencia en las funciones del suelo, en su calidad, y en la productividad (Shukla *et al.*, 2004; Galantini & Rosell, 2006).

Para la segunda dimensión, las variables seleccionadas fueron: H y Al intercambiables, en tanto que para la tercera dimensión la única variable que presentó una alta carga fue el fósforo disponible.

La primera dimensión fue etiquetada como “fertilidad química” por estar asociada a los macronutrientes, al pH y al carbono orgánico, íntimamente relacionados a la disponibilidad de nutrientes (McColl & Gressel, 1995).

La segunda dimensión, fue etiquetada como “acidez potencial” por estar conformada principalmente por aluminio e hidrógeno intercambiables (González *et al.*, 2000), y la tercera como “disponibilidad de fósforo” por su relación con la variable P disponible.

4.4.2.3 Construcción de índices de calidad química:

En base a las formulaciones matemáticas provenientes del ACP, teniendo en cuenta las 3 primeras componentes y las variables seleccionadas, se obtuvieron 3 índices de calidad química del suelo.

A partir de la CP1, el índice obtenido se denominó IQ-30-1, su formulación fue:

$$\text{■ } Y1 = Ca * 0,43 + CO * 0,32 + N * 0,35 + pH * 0,35 + K * 0,30 + Mg * 0,32$$

y correspondió a un índice de calidad relacionado a la “fertilidad química” del suelo. El mismo tomará mayores valores, cuanto mayor sea el contenido de CO, de macronutrientes y el pH del suelo. Es decir que valores altos del índice IQ-30-1, deberían asociarse a suelos de alta calidad (selva subtropical).

A partir de la CP2, el índice desarrollado se denominó IQ-30-2, su formulación fue:

$$\text{■ } Y2 = Al * 0,36 + H * 0,32$$

y correspondió a un índice de calidad relacionado a la “acidez potencial”. El mismo será mayor cuando mayores sean los contenidos de aluminio e hidrógeno intercambiables, y estaría asociado a una menor calidad de suelo.

A partir de la CP3, el índice desarrollado se denominó IQ-30-3, su formulación fue:

$$\text{■ } Y3 = P * 0,75$$

y correspondió a un índice de calidad relacionado a la “disponibilidad de fósforo” para las plantas. El mismo sólo depende del contenido de fósforo disponible para las plantas, por cuanto valores altos estarían asociados a suelos de alta calidad.

Superponiendo la información otorgada por el círculo de correlaciones (Fig 4.5) y el bi-plot de individuos y elipses de confianza (Fig. 4.6) se puede observar que los suelos prístinos se ubicaron a la derecha del plano con mayores contenidos de CO, N, y de bases cambiables. Los suelos bajo yerba se ubicaron a la izquierda con los menores contenidos de CO, N, y de bases cambiables, en tanto que los suelos bajo tabaco y citrus lo hicieron en una posición intermedia.

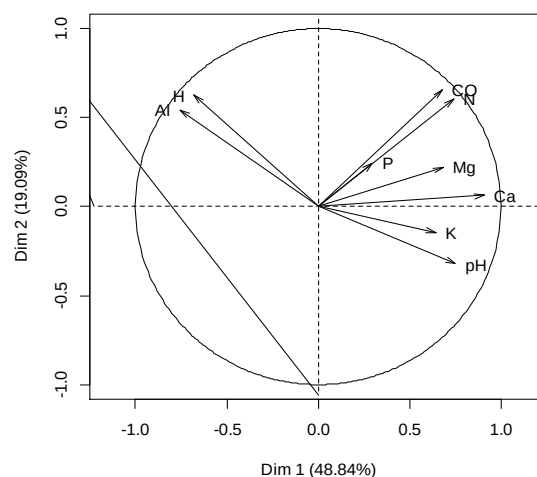


Figura 4.5. Círculo de correlaciones con la representación de las variables químicas respecto a las componentes o dimensiones (Dim) 1 y 2

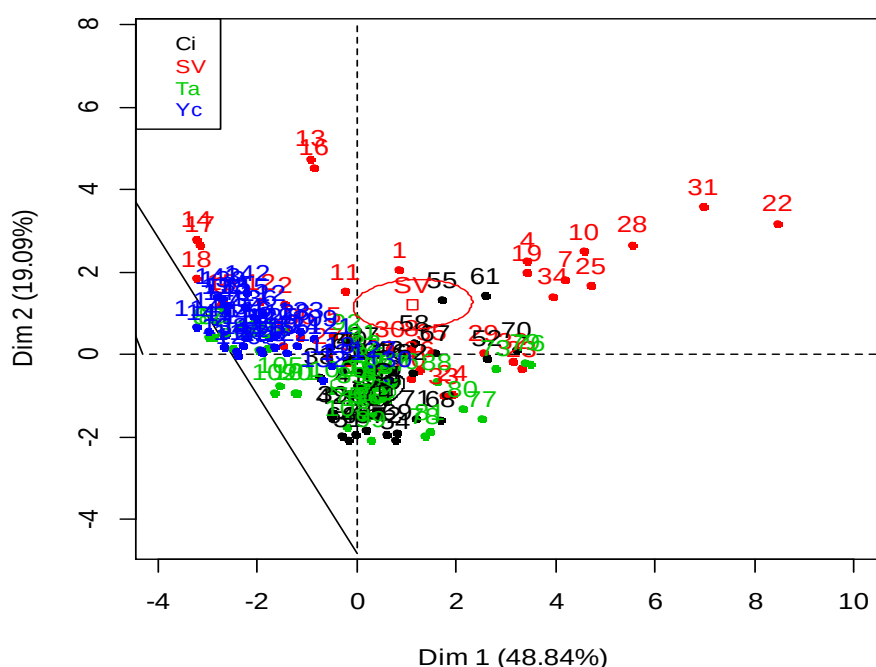


Figura 4.6: Gráfico bi-plot correspondiente al ACP de las variables químicas de 0-0,30 m: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes ó dimensiones 1 y 2.

Respecto a la CP2, los suelos bajo yerba presentaron la mayor acidez intercambiable, seguida de la Sv, en tanto que los suelos bajo tabaco y citrus la menor acidez, lo cual se atribuyó al hecho de haber recibido enmiendas cálcicas. Se puede apreciar también que los suelos bajo selva presentaron la mayor disponibilidad de P y los suelos bajo yerba mate la menor disponibilidad, ubicándose en una posición intermedia los sistemas Ci y Ta, lo cual fue atribuido a que en ambos casos recibieron fertilizaciones con fósforo.

En la Figura 4.5, también se puede observar el grado de asociación entre las variables, determinada por la separación angular que forman sus proyecciones, donde la mejor asociación estuvo constituida por el carbono orgánico y el nitrógeno total por un lado y por otro, por el aluminio y el hidrógeno intercambiables.

4.4.2.4 Puntuaciones de los índices de calidad química para los distintos usos de suelo:

A partir de la aplicación de las formulaciones obtenidas de las CP, y de los valores de las variables previamente estandarizados, se obtuvieron las puntuaciones de los índices químicos para los distintos sistemas de uso (Tabla 4.8).

Tabla 4.8: Puntuaciones o “scores” obtenidos para los índices de calidad química, bajo los sistemas selva (Sv), citrus (Ci), yerba mate (Yc) y tabaco (Ta). Anova y Prueba LSD ($p < 0,05$).

IQ-30-1 “Fertilidad química”		IQ-30-2 “Acidez potencial”		IQ-30-3 “Disponibilidad de fósforo”	
Sistema		Sistema		Sistema	
Sv	1,23a	Yc	0,77a	Ci	0,21a
Ci	0,08b	Sv	0,15b	Ta	-0,02ab
Ta	-0,13b	Ci	-0,59c	Sv	-0,06ab
Yc	-1,18c	Ta	-0,33c	Yc	-0,14b
<i>p-valor</i>	0,0001	<i>p-valor</i>	0,0001	<i>p-valor</i>	0,224

El índice de fertilidad, fue mayor en suelos bajo vegetación climax, seguido por los sistemas citrus y tabaco, como consecuencia de los aportes de fertilizantes y

encalado, e indicando una menor calidad de suelo para el sistema de yerba mate. Las fertilizaciones y encalados periódicos produjeron un efecto positivo, evitando mayores pérdidas de fertilidad. En suelos caracterizados por la predominancia de arcillas de baja actividad (Oxisoles y Ultisoles), el encalado se efectúa para neutralizar la acidez debida al aluminio intercambiable, la práctica aumenta la saturación de bases y favorece la fertilidad del suelo (Espinosa & Molina, 1999).

El índice de acidez para selva fue de 0,15, siendo mayor en suelos cultivados sin enmiendas (yerba mate), y disminuyó cuando el suelo agrícola fue encalado (citrus y tabaco).

El índice de disponibilidad de fósforo no fue sensible para distinguir entre usos de suelos ($p < 0,224$).

4.5.3 ÍNDICES DE CALIDAD BIOLÓGICA

A partir del ACP basado en la matriz de correlaciones, se obtuvieron en total, 6 componentes principales (CP) ó dimensiones, de las cuales se presentan sólo las primeras 5 (Tabla 4.9).

La componente principal 1, explicó la mayor variabilidad (66%), en tanto que las componentes 2 y 3 explicaron un 16% y un 10% respectivamente.

Tabla 4.9: Primeras 5 componentes principales obtenidas para las variables biológicas evaluadas en los 0,30 m del perfil de suelo, sus autovalores, proporción de variancia explicada y variancia acumulada.

CP	1	2	3	4	5
Autovalor	3,959	0,996	0,622	0,255	0,166
Proporción	2,962	0,374	0,366	0,089	0,166
Acumulada	0,659	0,166	0,103	0,042	0,027

Se puede observar, que las dos primeras dimensiones, explicaron un 82% de la variabilidad total.

4.4.3.1 Selección del número de componentes: En base a los autovalores >1 , y examinando los gráficos de codo ó scree plots (Fig. 4.7), sólo la componente 1 fue seleccionada.

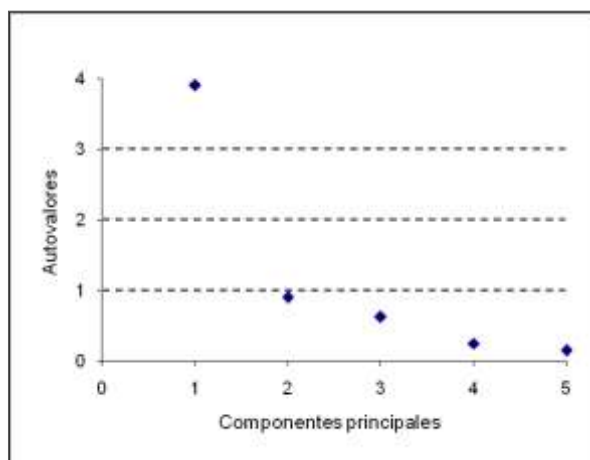


Figura 4.7: Gráfico de codo o Scree plot de propiedades biológicas de 0-0,30 m

4.4.3.2 Selección de atributos de calidad dentro de cada componente principal: se consideraron con contribución significativa a cada componente principal, aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas $>2/3$ de la carga máxima y una alta correlación con las componentes (Tabla 4.10).

Tabla 4.10: Autovectores de componente seleccionada. Se señalan con negrita a la carga máxima y con *, a aquellas variables cuyos autovectores presentaron cargas $>2/3$ de la carga máxima.

Variable	CP1
MOPa	0,45*
MOPb	0,46*
MOP	0,47
Npm	0,38*
Enz	0,42*
Res	0,14

En la componente seleccionada, presentaron alta cargas las variables MOPa, MOPb, MOP, Npm y Enz.

En el círculo de correlaciones (Fig. 4.8), se puede observar que todas las variables, excepto Res, presentaron una correlación alta y positiva con la CP1.

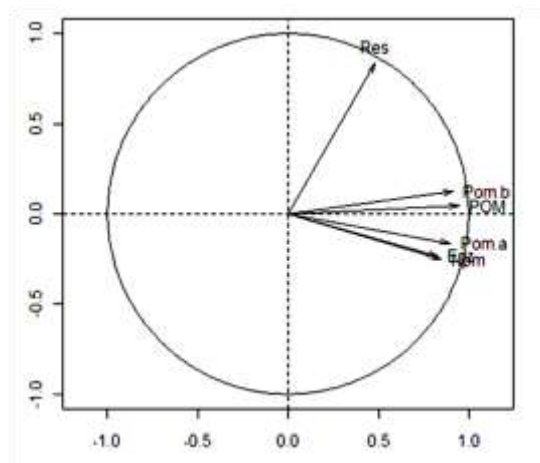


Figura 4.8. Círculo de correlaciones con la representación de las variables biológicas respecto a las componentes o dimensiones 1 y 2

La CP1 fue el principal eje de variabilidad, articulando las figuras 4.8 y 4.9, se puede observar que los suelos sin disturbación antrópica (selva) se ubicaron mayormente sobre la derecha del plano, presentando los mayores contenidos de MOP, MOPa y MOPb, como así también mayor actividad de las enzimas fosfatasas (Enz).

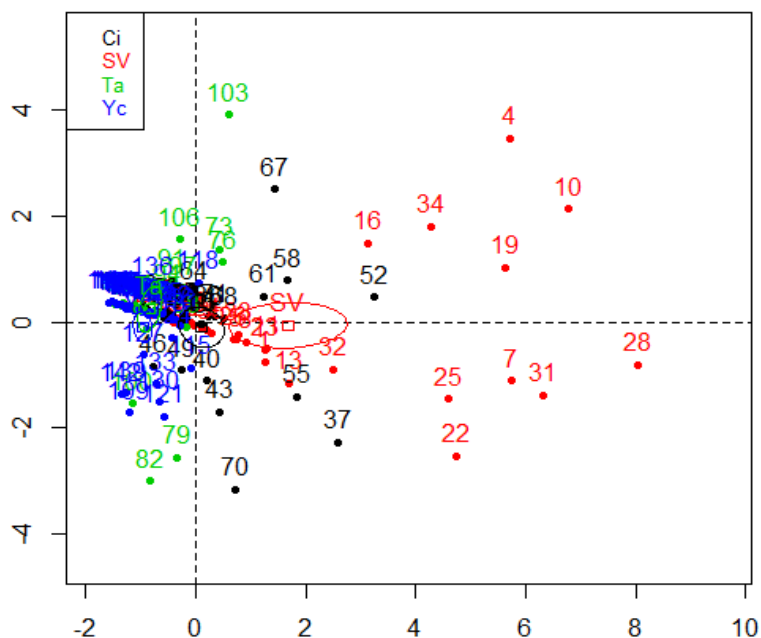


Figura 4.9: Gráfico *bi-plot* correspondiente al ACP de las variables biológicas: elipses de confianza al 95% rodeando las categorías de uso del suelo, sobre el plano principal producido por las componentes ó dimensiones 1 y 2.

A la izquierda del plano, se ubicaron los suelos bajos usos yerbatero y tabacalero, presentando los menores contenidos de materia orgánica

particulada y menor actividad biológica (Npm y Enz). Los correspondientes al tratamiento citrus adoptaron una posición intermedia entre selva y los usos yerba y tabaco.

En la Figura 4.8 se puede observar respecto al grado de asociación entre las variables, que la mayor asociación estuvo dada por el nitrógeno potencialmente mineralizable, la actividad de las enzimas fosfatasas ácidas y la fracción de materia orgánica particulada más gruesa (MOPa).

4.4.3.3 Construcción de índices de calidad biológica:

Para la construcción del índice se seleccionó la componente 1 y dentro de ésta las variables MOPa, MOPb, Npm y Enz. No se seleccionó la variable **Res**, por presentar baja correlación con la CP1 ($r=0,28$), como tampoco MOP a los efectos de evitar redundancia ya que la misma resultó de la sumatoria de las fracciones MOPa y MOPb.

En base a la formulación matemática provenientes del ACP, teniendo en cuenta la CP1, y las variables seleccionadas, se obtuvo el siguiente índice de calidad biológica del suelo.

A partir de la CP1, el índice obtenido se denominó IB-30-1 “Índice de Actividad biológica”, su formulación fue:

$$\blacksquare \quad Y1 = MOPa * 0,45 + MOPb * 0,46 + Npm * 0,38 + Enz * 0,42$$

El índice IB-30-1, depende de las variables MOP en sus distintas fracciones, Npm y actividad de la enzima fosfatasa ácida, es decir que está relacionado al sustrato orgánico fácilmente mineralizable, a su mineralización y al potencial de proveer nutrientes en el corto plazo. El índice tomará valores más altos, cuanto mayor sea la calidad del suelo.

4.4.3.4 Puntuaciones de los índices de calidad biológica para los distintos usos de suelo:

Las puntuaciones de los índices bajo los distintos sistemas de uso (Tabla 4.11), pueden obtenerse directamente a través de software R, aplicando el paquete

FactomineR o calcularse aplicando las formulaciones obtenidas de las CP, a los valores de las variables estandarizados.

Tabla 4.11: Puntuaciones o “scores” para el índice de calidad biológica del suelo, bajo los sistemas selva (Sv), citrus (Ci), yerba mate (Yc) y tabaco (Ta). Anova y Prueba LSD ($p < 0,05$).

IB-30-1 “Actividad biológica”	
Sistema	
Sv	1,38a
Ci	0,14b
Ta	-0,74c
Yc	-0,78c
<i>p-valor</i>	0,0001

El índice tomó el mayor valor para suelos de alta calidad (selva) y resultó sensible para distinguir entre usos, estableciendo el siguiente orden de calidad Sv>>Ci>Ta y Yc.

Los suelos bajo selva presentaron la mayor calidad biológica, lo cual se asoció a una mayor acumulación de material vegetal (hojarasca y/o residuos) en los primeros centímetros del perfil favoreciendo la acumulación de MO, principalmente de material particulado ó carbono lábil (Eiza *et al.*, 2005), material orgánico fácilmente descomponible. La materia orgánica es esencial para la actividad biológica del suelo, proporciona recursos energéticos a los organismos del suelo, en forma de carbono lábil (Martínez *et al.*, 2008).

El menor valor del índice para suelos bajo cultivos de yerba mate y tabaco fue atribuido a que en éstos el producto de la cosecha son las hojas, siendo por lo tanto menor el aporte de MO, como así también menor la mineralización del nitrógeno y la actividad enzimática tal como fuera indicado en el Cap. 4. Tanto la destrucción de los agregados, acelerando la degradación de los materiales orgánicos lábiles, como la disminución de residuos debido a la extracción de material foliar por las cosechas, conllevan a un menor retorno de biomasa y reducen el carbono orgánico del suelo (Reeves, 1997; Pícolo *et al.*, 2004). La

disminución del potencial del suelo para mineralizar nitrógeno está relacionado a una menor actividad microbiana y una degradación de las propiedades biológicas del suelo (Deenik, 2006).

4.5 CONCLUSIONES:

- Se desarrollaron 6 índices de calidad de suelo:
 Dos índices de calidad física: IF-30-1 ó de “Agregación”, IF-30-2 ó índice de “Resistencia mecánica”.
 Tres índices de calidad química: IQ-30-1 ó Índice de “Fertilidad”, IQ-30-2 ó “Índice de Acidez”, IQ-30-3 ó Índice de “Disponibilidad de P”.
 Un índice de calidad biológica: IB-30-1 ó índice de “Actividad biológica”.
- El índice de disponibilidad de fósforo no resultó efectivo para diferenciar estadísticamente las distintas situaciones evaluadas.
- Los índices desarrollados que resultaron más sensibles para distinguir entre usos de suelo, fueron el índice de Agregación, el de Fertilidad y el de Actividad biológica, los cuales establecieron el siguiente orden de calidad:

IF 30-1: $S_v > Y_c > C_i > T_a$

IQ 30-1: $S_v > C_i = T_a > Y_c$

IB 30-1: $S_v > C_i > T_a = Y_c$

PARTE III: VALIDACIÓN DE LOS ÍNDICES DESARROLLADOS Y APLICACIÓN DE ÍNDICES PREEXISTENTES

CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN DE LOS ÍNDICES DESARROLLADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos de ecosistemas naturales tienen propiedades físicas, químicas y biológicas específicas, determinadas por las condiciones en las cuales se han desarrollado, alcanzando un equilibrio entre sus propiedades (Gil-Sotres *et al.*, 2005), y pueden ser utilizados como situaciones de referencia en estudios de calidad de suelo (Doran *et al.*, 1994; Zornoza *et al.*, 2008). La calidad de los suelos desarrollados bajo vegetación climax pueden ser considerados de alta calidad (Doran *et al.*, 1994), teniendo en cuenta que están en equilibrio con el ambiente y que no han sufrido disturbios debidos a la actividad del hombre, por cuanto la pérdida de calidad estará asociada a la pérdida de ese equilibrio (Leirós *et al.*, 1999).

El uso del suelo, las prácticas de manejo, los sistemas de cultivos, el uso de fertilizantes y de pesticidas, conducen a modificaciones de ese equilibrio natural (Doran & Zeiss, 2000; Wienhold *et al.*, 2006), por lo que conocer la dirección y la tasa de esos cambios resulta importante a la hora de evaluar el impacto que tienen los diferentes sistemas de cultivo.

Los índices de calidad, son considerados de crucial importancia en la determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008).

Los índices desarrollados a partir de formulaciones matemáticas o modelos, deben ser validados, a fin de comprobar su efectividad y su sensibilidad. La validez de un modelo matemático, debe ser juzgada en base a la sustentabilidad para un determinado propósito, de manera que será válido si logra lo que se espera de él (Tedeschi, 2004).

En el caso de los índices de calidad de suelo, los mismos serán válidos cuando sean sensibles a los cambios por efecto del uso del suelo. De modo que cualquier perturbación que se produzca por el uso, producirá cambios en las distintas propiedades, y los índices para ser considerados válidos deberán ser capaces de reflejarlos (Zornoza *et al.*, 2008).

Para validarlos, lo ideal es aplicar las formulaciones o modelos a otro set de datos, es decir comparar sus estimaciones con observaciones que no hayan sido empleadas en la elaboración o calibración de los mismos (Boote *et al.*, 1996).

Un buen índice de calidad, será aquel que resulte sensible a las alteraciones producidas en el suelo, detectando los cambios debidos a los sistemas de cultivo, a las practicas agronómicas y al manejo del suelo, reflejando el progresivo incremento o disminución de la calidad (Burger & Kelting, 1999; Leirós *et al.*, 1999; Doran *et al.*, 1994; Zornoza *et al.*, 2008), permitiendo así el monitoreo de su dinámica.

5.2 OBJETIVO

Determinar la efectividad y sensibilidad, de los índices obtenidos a partir de la aplicación de técnicas multivariadas (Cap. 5), aplicando pruebas de validación.

5.3 MATERIALES y MÉTODOS

Los 5 índices desarrollados fueron validados, aplicando las formulaciones matemáticas a datos obtenidos bajo sistemas naturales y cultivados del Departamento de Oberá (Misiones) diferentes a los usados para su construcción, siguiendo lo propuesto por Boote *et al.* (1996) y en base a los residuales, aplicando la metodología propuesta por Zornoza *et al.* (2008).

5.3.1 Validación a partir de la aplicación de los índices a otros sistemas naturales y cultivados:

Para la validación de los índices obtenidos (Cap. 4), se aplicaron las formulaciones matemáticas a datos provenientes de Oxisoles del departamento de Oberá, bajo sistemas naturales y cultivados (Cap. 2), diferentes a los utilizados para la construcción de los índices a validar. Los sistemas fueron 4: selva subtropical (SV), forestación con *Pinus* sp. (Pi), cultivo de maíz bajo labranza convencional (Mz) y cultivo de té (Té), donde se obtuvieron muestras de suelo a las mismas profundidades (0-0,10, 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m) y se determinaron las propiedades necesarias para la aplicación de los distintos índices.

A continuación se detallan los parámetros determinados para cada índice a validar, las determinaciones analíticas empleadas fueron detalladas en el Cap. 2):

Índice de Agregación (IF-30-1):

- Densidad aparente (Da): extracción de muestras inalteradas por el método del cilindro (Forsythe, 1975).
- Estabilidad de agregados (EA): Método de Kemper & Rosenau (1986).
- Espacio aéreo (Eae): por cálculo sobre la base de los datos de densidad aparente y de partículas. Densidad de partículas: Método del Picnómetro (Blake & Hartge, 1986).
- Infiltración básica (Ib): Método del anillo simple (Lowery *et al.*, 1996) y,
- Humedad equivalente (HE): Método de la Centrífuga. (Montenegro González *et al.*, 1990).

Índice de Resistencia ó de Dureza (IF-30-2):

- Resistencia a la penetración con penetrómetro de cono (Bradford, 1986).

Índice de Fertilidad química (IQ-30-1):

- Carbono orgánico (CO): Método de Walkley & Black modificado. (Nelson & Sommers (1996).
- Nitrógeno total (N): Método semimicrokjeldahl (Bremmer & Mulvaney, 1982).
- Calcio (Ca), magnesio (Mg), y potasio (K) intercambiables (Dewis & Freitas, 1970).

Índice de Acidez potencial (IQ-30-2):

- Hidrógeno (H) y aluminio (Al) intercambiables (Dewis & Freitas, 1970).

Índice de Actividad biológica (IB-30-1):

- Materia orgánica particulada (MOPa y MOPb): fraccionamiento físico de Cambardella *et al.* (1999) través de tamices de 500 y 53 μ m, para separar dos fracciones: de 2 a 0,5 mm (MOPa) y de 0,5 a 0,053 mm (MOPb).
- Nitrógeno potencialmente mineralizable, Npm, (Waring & Bremner modificado por Keeney & Nelson, 1982).
- Actividad enzimática de la fosfatasa ácida, Enz, (Tabatabai, 1982).
- Respiración de suelo, Res, (Sarrantonio *et al.*, 1996).

Los valores correspondientes a éstos indicadores obtenidos para los sistemas arriba mencionados, se pueden observar en el Anexo (Tablas III, IV y V).

Previamente a la aplicación de las siguientes formulaciones obtenidas por ACP (Cap. 4), los datos correspondientes a las distintas variables, fueron estandarizados (media=0 y desvío=1).

Índices físicos:

■ $IF-30-1 = Eae*0,54 + HE*0,44 + EA*0,41 + Ib*0,40 - Da*0,57$ (Ecuación 1)

■ $IF-30-2 = RP*0,92$ (Ecuación 2)

Índices químicos:

■ $IQ-30-1 = Ca*0,43 + CO*0,32 + N*0,35 + pH*0,35 + K*0,30 + Mg*0,32$ (Ecuación 3)

■ $IQ-30-2 = Al*0,36 + H*0,32$ (Ecuación 4)

Índice biológico:

■ $IB-30-1 = MOPa*0,45 + MOPb*0,46 + Npm*0,38 + Enz*0,42$ (Ecuación 5)

Se lograron así las puntuaciones, “scores” o valores para los índices de calidad física, química y biológica, correspondientes a los distintos usos de suelo.

Posteriormente, a los efectos de evaluar si los índices obtenidos resultaron sensibles a las alteraciones ocasionadas por el manejo y las prácticas agronómicas, se realizaron ANOVAS y Pruebas LSD ($p < 0,05$) utilizando el software Infostat 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

5.3.2 Validación en base a diferencias de residuales:

En base a los valores de los índices obtenidos para los distintos sistemas naturales y cultivados de la Etapa II (E2), se procedió a la validación siguiendo la metodología propuesta por Zornoza *et al.* (2008).

Se aplicó la fórmula:

Índice situación de referencia (E1) – Índice sistema evaluado (E2) = Residuales

Estableciendo así las diferencias entre la situación prístina, tomada como referencia de alta calidad de suelo en la Etapa I (E1) durante la construcción de los índices, y los sistemas naturales (selva) y cultivados (té, maíz y pino) de la etapa II (E2).

Se trabajó bajo la siguiente **hipótesis**:

Para considerar válido un índice, los “Sistemas naturales ó suelos climax” (en equilibrio, de alta calidad), deberán presentar **residuales cercanos a 0** (dentro del 99% del intervalo de confianza de la calibración del modelo); en tanto **que los** “Sistemas disturbados” (suelos bajo uso agrícola ó forestal), deberán

presentar **residuales** $< \acute{o} > 0$, con valores más alejados del 0 cuanto mayor disturbio haya sufrido el suelo.

5.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.4.1 Validación a partir de la aplicación de los índices a otros sistemas naturales y cultivados:

Las puntuaciones obtenidas para los **índices de calidad física**, se observan en la Tabla 5.1.

El índice de “Agregación” resultó sensible para distinguir entre usos de suelo y fue mayor en los suelos de alta calidad (selva subtropical) y menor en los suelos bajo uso agrícola y forestal. El cultivo del suelo reduce la estabilidad de agregados respecto a la situación prístina (Wendling *et al.*, 2005). El menor valor correspondió a los suelos bajo cultivo de té, con valores intermedios para los suelos bajo cultivo de maíz y plantación de pino, con diferencias significativas ($p < 0,0001$).

Tabla 5.1: Puntuaciones o “Scores” de los índices de calidad física correspondientes a los distintos usos de suelo: selva subtropical (SV), cultivo de maíz (Mz), cultivo de té (Té) y forestal de *Pinus sp.* (Pi). ANOVA y Prueba LSD ($p < 0,05$).

Trat.	“Agregación” IF-30-1	Trat.	“Resistencia ó dureza” IF-30-2
SV	2,35a	Té	1,28a
Pi	0,11b	Pi	-0,29b
Mz	-0,03b	SV	-0,36bc
Té	-1,6c	Mz	-0,58c
<i>p-valor</i>	<0,0001	<i>p-valor</i>	<0,0001

El índice de agregación, señaló que el suelo agrícola sin remoción (cultivo de Té), presentó una mayor densificación, menor macroporosidad y pérdida de la estabilidad de agregados, con una menor infiltración, y menor capacidad para

retener agua para el cultivo. La no remoción de suelo, puede provocar una disminución de los macroporos, incrementando la compactación relativa del suelo, e impactar sobre el normal movimiento del agua (Ferrerías *et al.*, 2007).

El índice de “Resistencia ó Dureza”, fue mayor para los suelos bajo cultivo de Té, lo cual se asoció a la no remoción de suelo y al mayor tránsito de maquinarias (5 a 6 cosechas anuales), y se correspondió con el menor índice de agregación observado. Hakansson & Voorhees (1997), expresaron que repetidas pasadas de maquinarias pesadas causan efectos de compactación acumulativa. El menor valor, correspondió a suelos bajoremoción anual (maíz), en tanto que el sistema forestal presentó valores de dureza intermedios entre los sistemas té y maíz, con diferencias significativas.

Los suelos bajo selva (alta calidad), presentaron valores de “Resistencia” similares a los suelos bajo pino y maíz, por cuanto el índice de “Resistencia ó dureza” no resultó válido para distinguir el sistemas prístinos, de disturbados.

Tanto el índice de “agregación” como el de “dureza”, señalaron al cultivo de Té como el sistema más degradante, presentando la menor calidad física de suelo. El monocultivo continuo por más de 40 años, la no remoción del suelo, y el peso y tránsito de las maquinarias, produjeron una destrucción de la estructura original del suelo con ruptura de macroagregados a microagregados, disminución de la macroporosidad, disminución de la estabilidad de los agregados y aumento de la densidad aparente y de la resistencia mecánica a la penetración.

Las puntuaciones obtenidas para los **índices de calidad química**, se observan en la Tabla 5.2.

El índice de “Fertilidad”, presentó el mayor valor en los suelos de referencia de alta calidad (selva) y el menor valor, en suelos bajo uso forestal señalando el siguiente orden de calidad SV>Té>Pi, presentando los suelos bajo labranza convencional (maíz) condiciones entre SV y Té. En regiones subtropicales, los

suelos bajo selva reciben un constante aporte de MO no sólo desde la hojarasca sino también por la gran abundancia de raíces y raicillas que se renuevan constantemente (Dalurzo *et al.*, 2005). Tanto la destrucción de los agregados, acelerando la degradación de los materiales orgánicos lábiles, como la disminución de residuos por extracción por las cosechas, producen una disminución de la MO del suelo (Six *et al.*, 1998; Píccolo *et al.*, 2004). En el caso del cultivo de té la cosecha del material foliar produjo una disminución drástica de los aportes, y en el caso del cultivo de maíz la remoción anual del suelo favoreció la mineralización de la MO.

En suelos bajo maíz, la pérdida de fertilidad, se atribuyó a la labranza convencional y al monocultivo. Las labranzas pueden ocasionar pérdida de carbono del suelo y un aumento del CO₂ liberado, debido a que la remoción del suelo facilita una mejor accesibilidad para el oxígeno necesario para la respiración y descomposición de la materia orgánica, produciéndose una mayor liberación de CO₂ (USDA, 1999). Pérdidas de MO, en suelos rojos del subtrópico, por efecto del uso del suelo, fueron halladas también por otros autores como Píccolo *et al.* (1998) en Ultisoles de Misiones bajo cultivo de yerba y Amado *et al.* (2006) en Oxisoles del sur de Brasil bajo cultivo de poroto negro-maíz. El menor índice de Fertilidad, correspondió a suelos bajo plantación de pino, lo cual se asoció a las características propias del material orgánico (rico en lignina y pobre en bases), que limitan la mineralización de la materia orgánica (Fernández, 1987).

Tabla 5.2: Puntuaciones o “Scores” de los índices de calidad química correspondientes a los distintos usos de suelo: selva subtropical (SV), cultivo de maíz (Mz), cultivo de té (Té) y forestal de *Pinus sp.* (Pi). ANOVA y Prueba LSD ($p < 0,05$).

Trat.	“Fertilidad” IQ-30-1	Trat.	“Acidez” IQ-30-2
SV	0,85a	Pi	0,38a
Mz	0,23ab	Té	-0,14b
Té	0,05b	SV	-0,25bc
Pi	-0,9c	Mz	-0,56c
<i>p-valor</i>	<0,0001	<i>p-valor</i>	<0,0001

Las prácticas de encalado periódico (maíz y té) y de fertilizaciones anuales (Té), permitieron que la caída de la fertilidad del suelo sea menos marcada comparada con los suelos bajo uso forestal.

El índice de “Acidez” no resultó válido para distinguir el sistema prístino de alta calidad de suelo, de los sistemas que recibieron encalado. El sistema forestal presentó el mayor índice de “acidez” del suelo y el menor índice de “fertilidad”. Lo cual se atribuyó al no encalado y a la alta acidez del material orgánico aportado (acículas de pino). Autores como Tosin (1977) y Fernández (1987), encontraron en suelos rojos, aumento de la acidez, disminución del contenido de bases (principalmente Magnesio), como así también de carbono orgánico, cuando el suelo desmontado fue reforestado con *Pinus Ellioti* o *P. Taeda* y lo atribuyeron a la calidad de materia orgánica aportada al suelo asociada a un bajo contenido en sales minerales y bases, que produjo la acidificación del medio y la proliferación de hongos.

Los dos índices de calidad química, señalaron al sistema forestal de *Pinus sp.* como el más degradante, presentando la menor calidad química de suelo.

Las puntuaciones obtenidas para el **índice de calidad biológica**, se pueden observar en la Tabla 5.3.

El mayor valor correspondió a los suelos vírgenes (referencia de alta calidad), con diferencias significativas respecto a los suelos cultivados. El índice resultó sensible para distinguir entre suelos prístinos y suelos con disturbio antrópico, pero no distinguió entre sistemas de cultivo. El menor índice de Actividad biológica para suelos bajo cultivo, estuvo asociado a un menor contenido de material orgánico fácilmente descomponible o materia orgánica particulada (MOP), a un menor potencial del suelo para mineralizar el nitrógeno orgánico (Npm) y a una menor actividad de la enzima fosfatasa ácida (Enz) para mineralizar el fósforo orgánico.

En general, suelos bajo cultivo presentan menor actividad biológica que suelos bajo vegetación climax (Leirós *et al.*, 1999).

Tabla 5.3: Puntuaciones o “Scores” de los índices de calidad biológica correspondientes a los distintos usos de suelo: selva subtropical (SV), cultivo de maíz (Mz), cultivo de té (Té) y forestal de *Pinus sp.* (Pi). ANOVA y Prueba LSD ($p < 0,05$).

Trat.	Actividad biológica
	IB-30-1
SV	0,79a
Té	-0,22b
Pi	-0,23b
Mz	-0,34b
<i>p-valor</i>	0,0004

La MOP al ser el material más joven y activo del suelo, es un indicador temprano de calidad (Six *et al.*, 2002), que cumple un importante rol en el funcionamiento del suelo, por ser un reservorio de nutrientes, favorecer la estabilidad de los agregados, y proveer sustrato fácilmente descomponibles a los microorganismos del suelo (Bronson *et al.*, 2004). En los sistemas agrícolas su contenido es menor que bajo sistemas climax (selva), y es el responsable de la

rápida caída de los contenidos de MO al cultivar suelos vírgenes (Dalurzo *et al.*, 2005; Amado *et al.*, 2006; Galantini & Suñer, 2008).

Asimismo, autores como Campbell & Souster (1982), Bachmeier & Rollán (2004), Videla *et al.* (2005), Valles de la Mora *et al.* (2008), señalaron para distintos órdenes de suelo, que el potencial para mineralizar nitrógeno es menor en suelos agrícolas que en sistemas naturales y que disminuye con los años de agricultura principalmente en el horizonte A, hasta una cierta edad cultural (20 años), superada la cual, el potencial de mineralizar N alcanzaría un pseudoestado estacionario, a partir del cual los procesos de degradación progresarían con menor intensidad (Bachmeier & Rollán, 2004).

Los índices han confirmado que las prácticas agronómicas causan un disturbio del equilibrio natural de los suelos vírgenes. El cambio en el uso del suelo, y las prácticas de fertilización y encalado, han llevado a situaciones de desbalance en las propiedades físicas, químicas y biológicas, que se reflejaron en los índices a través de los indicadores de calidad. La disrupción del equilibrio bioquímico a causa de las prácticas agrícolas ha sido verificada a través de índices por otros autores como Trasar-Cepeda *et al.* (1998), Leirós *et al.* (1999) y Zornoza *et al.* (2008).

5.4.2 Validación en base a los residuales:

En la tabla 5.4, se pueden observar las medias de los residuales obtenidos.

Los índices IF-30-2 (Resistencia ó Dureza) y IQ-30-2 (Acidez), presentaron valores cercanos a cero tanto para suelos bajo selva, como para suelos bajo usos agrícola y forestal. Por lo tanto, no resultaron índices válidos para distinguir entre situaciones prístinas, y situaciones con disturbio antrópico.

Los índices IF-30-1 ó de Agregación, IQ-30-1 ó de Fertilidad e IB-30-1 ó de Actividad biológica, presentaron valores cercanos a cero para la situación prístina de alta calidad de suelo, y valores >1 para sistemas cultivados. Los índices mencionados resultaron válidos para evaluar calidad de suelo y sensibles para distinguir entre usos de suelo.

Tabla 5.4: Medias de residuales obtenidos para los índices de calidad física (IF), química (IQ) y biológica (IB) calculados para los primeros 0,30 m de profundidad para los sistemas del Departamento de Oberá (Misiones): sistema natural (SV), sistemas agrícolas: té y maíz (Mz) y sistema forestal bajo *Pinus sp* (Pi).

	Medias de residuales				
	IF-30-1	IF-30-2	IQ-30-1	IQ-30-2	IB-30-1
	Agregación	Resistencia	Fertilidad	Acidez	Act. biológica
SV	-0,08	0,09	0,38	0,4	0,59
Té	3,86	-1,53	1,18	0,29	1,60
Mz	2,29	0,31	1	0,71	1,72
Pi	2,15	0,03	2,13	-0,23	1,61

A continuación se pueden observar de manera gráfica la distribución de los residuales y el rango de los intervalos de confianza (al 99%) obtenidos para los índices de Agregación (Fig. 5.1), de Fertilidad (Fig. 5.2) y de Actividad biológica (Fig. 5.3), bajo los sistemas natural, forestal y agrícola. El intervalo de confianza fue calculado en base a la media muestral $\pm$ el producto del valor crítico $Z_{\alpha/2}$ por el desvío estándar (Little & Hills, 1981).

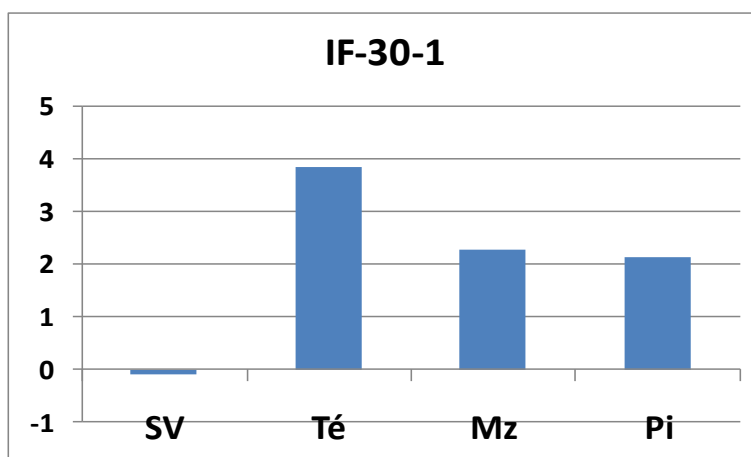


Figura 5.1: Residuales medios obtenidos para el índice de calidad física IF-30-1 (“Agregación”) bajo los distintos sistemas del Departamento de Oberá (Misiones): sistema natural (SV), sistemas agrícolas: té y maíz (Mz) y sistema forestal bajo *Pinus sp* (Pi). Límite 99% confianza (intervalo entre $\pm 2,97$).

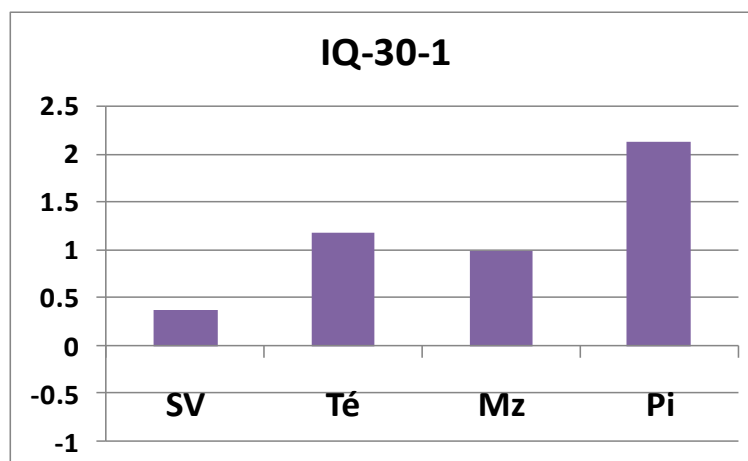


Figura 5.2: Residuales medios obtenidos para el índice de calidad química IQ-30-1 ("Fertilidad") bajo los distintos sistemas del Departamento de Oberá (Misiones): sistema natural (SV), sistemas agrícolas: té y maíz (Mz) y sistema forestal bajo *Pinus sp* (Pi). Límite 99% confianza (intervalo entre $\pm 4,01$).

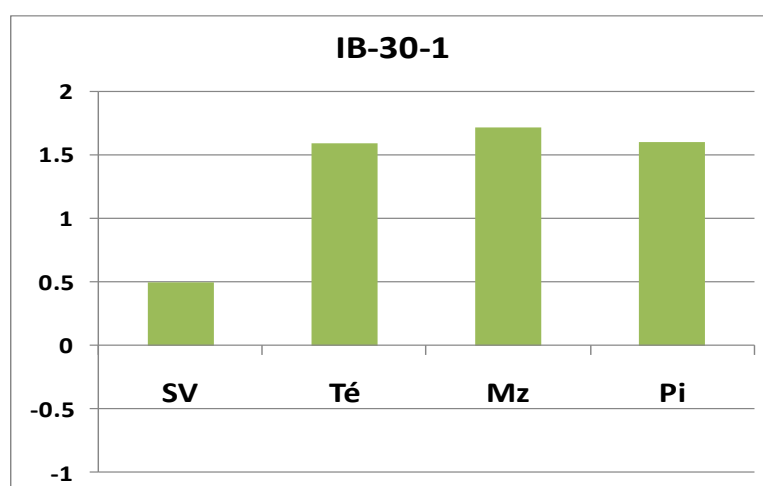


Figura 5.3: Residuales medios obtenidos para el índice de calidad biológica IB-30-1 ("Actividad biológica") bajo los distintos sistemas del Departamento de Oberá (Misiones): sistema natural (SV), sistemas agrícolas: té y maíz (Mz) y sistema forestal bajo *Pinus sp* (Pi). Límite 99% confianza (intervalo entre $\pm 4,7$).

En base a los intervalos de confianza, se observó que para los 3 índices, los residuales para los sistemas evaluados, se distribuyeron dentro de los límites de confianza, excepto para el tratamiento cultivo de Té en el que el residual del índice de Agregación (IF-30-1) se presentó fuera del límite, con un valor $> 2,97$.

A los efectos de evaluar este resultado, se procedió a observar los datos obtenidos para Té de las distintas variables que constituyeron el índice IF-30-1

(Ecuación 1), (Anexo, Tabla III), y se los comparó con los valores máximos y mínimos de los mismos atributos correspondientes a los sistemas originalmente (selva, citrus, yerba mate y tabaco) utilizados para desarrollar los índices (Límites de calibración) (Anexo, Tabla VI).

Los valores medios de densidad aparente ($1,46 \text{ g.cm}^{-3}$) y de espacio aéreo (10,6%), se encontraban fuera de los límites de calibración (Anexo, Tabla VI), motivo por el cual el índice de agregación para los suelos bajo té, se presentó fuera de los límites de confianza, perdiendo confiabilidad (Fig. 5.1).

5.5 CONCLUSIONES

- Los índices “Resistencia” y “Acidez”, no resultaron válidos para distinguir sistemas prístinos, de sistemas disturbados.
- Los índices “Agregación”, “Fertilidad” y “Actividad biológica”, fueron sensibles a las perturbaciones antrópicas, y resultaron válidos para cuantificar la calidad de los suelos y evaluar los efectos del cambio en el uso de las tierras, siempre que los valores de los indicadores constitutivos se mantuvieron dentro de los límites de calibración.
- Si bien los índices que resultaron válidos han sido desarrollados a partir de suelos prístinos y agrícolas, constituyeron una herramienta cuantitativa válida y confiable para determinar la calidad de Oxisoles no sólo en sistemas agrícolas sino también en sistemas forestales.

CAPÍTULO 6: APLICACIÓN DE FORMULACIONES PREEXISTENTES PARA EVALUAR CALIDAD DE SUELOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se han aplicado formulaciones matemáticas encontradas en la bibliografía, que están vinculadas a la materia orgánica del suelo (MO). Las mismas permitieron obtener otros índices que contribuyeron a conocer más sobre la calidad de los suelos bajo estudio, y a establecer relaciones con la información brindada por los índices desarrollados y validados en la presente Tesis (Cap. 4 y 5).

6.2 EL STOCK DE CARBONO COMO ÍNDICE DE CALIDAD DE SUELO

Los cambios en el carbono orgánico del suelo (CO), en respuesta al cambio en el uso de las tierras, han sido determinados en general por comparación de los stocks de carbono (SC) en diferentes sistemas. Para cuantificar las reservas de carbono del suelo (C) y efectuar comparaciones, lo más frecuente es expresar el C en términos de masa por unidad de área ($\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$), al multiplicar la concentración de carbono, por la densidad aparente del suelo a una profundidad fija (Ussiri *et al.*, 2006).

Abril & Noé (2007), han efectuado comparaciones entre sistemas o prácticas de manejo, basados en la concentración de C, en tanto que otros autores (Ellert *et al.*, 2001; Solomon *et al.*, 2002; Gifford & Roderick, 2003; Sisti *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2009) han destacado la importancia de comparar los SC, basados en una misma masa de suelo por unidad de área, proponiendo formulaciones diferentes para su cálculo.

Autores como Gifford & Roderick (2003) y McBratney & Minasny (2010), han propuesto métodos gráficos en sistemas de coordenadas, para calcular a través de interpolaciones el SC, en tanto que, Andriulo *et al.* (2008) propusieron calcular el stock a partir de una masa fija de suelo de 2500 Mg.

Es así, que actualmente existe en la bibliografía un gran número de métodos diferentes para calcular SC, sin que haya a la fecha una formulación adoptada en forma general.

Los sistemas de cultivo y las prácticas de manejo, pueden alterar el contenido de CO respecto a su condición original (Carvalho *et al.*, 2009), como así también producir modificaciones temporales y espaciales en la densidad aparente del suelo (Amador *et al.*, 2000; Kulmatiski & Beard, 2004). Sucede así que las masas de suelo consideradas, pueden llegar a ser diferentes en los sistemas a comparar, y afectar el stock de carbono (SC) calculado, llevando a conclusiones erróneas por sub-estimación o sobrestimación del mismo (Toledo *et al.*, 2013).

En suelos subtropicales rojos de Argentina y de Brasil, numerosos autores (Dalurzo, 2002; Gonzalez *et al.*, 2003; Dalurzo *et al.*, 2006; Cardoso-Niero *et al.*, 2010; Toledo *et al.*, 2010) han hallado un incremento de la densidad aparente y de la resistencia mecánica a la penetración, como consecuencia del uso agrícola. Muchos de los métodos utilizados más frecuentemente, no tienen en cuenta las variaciones en las masas de suelo producidas por el uso, lo cual trae como consecuencia problemas a la hora de efectuar comparaciones entre sistemas, como así también a la hora de tomar como referencia valores obtenidos por otros autores en suelos similares, bajo cultivos y condiciones climáticas semejantes, ya que la manera en que se realizan los cálculos incide en los resultados y conclusiones finales que se asumen.

6.2.1 Objetivos

- Examinar diferentes métodos para el cálculo del SC, y determinar de qué manera la masa de suelo considerada influye en la interpretación comparativa de los datos.
- Seleccionar el método más adecuado para evaluar stocks de carbono en suelos subtropicales rojos bajo distintos usos agrícolas.
- Determinar el SC en los distintos agro-ecosistemas.

- Evaluar el SC como un indicador de calidad de suelo, sensible a los cambios producidos por efecto del uso.

6.2.2 Hipótesis

- Los distintos métodos de cálculo de stock de carbono en los suelos bajo estudio, brindan resultados diferentes que pueden llevar a conclusiones erróneas respecto al impacto de los diferentes sistemas de cultivo.
- El stock de carbono es un indicador de mejoramiento, sostenimiento o degradación del suelo, que al estar vinculado a la calidad del suelo y del aire permite inferir si un sistema es o no más amigable con el ambiente que otro.

6.2.3 Materiales y métodos

Se determinaron densidad aparente (Da) por el método del cilindro (Forsythe, 1975) y carbono orgánico (CO) por oxidación húmeda (Walkley & Black modificado, Nelson & Sommers, 1996), descriptos en detalle en el Cap. 2. Considerando que en Oxisoles, el contenido de carbono inorgánico es despreciable, el CO fue considerado en este trabajo simplemente como carbono del suelo (C).

Los SC fueron calculados para los primeros 0,30 m del perfil de suelo, por ser la profundidad que contiene la reserva de C que más fácilmente puede ser alterada por el uso del suelo.

Las formulaciones utilizadas para su cálculo, descriptas en el Cap. 2, fueron agrupadas en 3 categorías:

- 1- *Formulaciones que no incluyen correcciones por masa de suelo:* como la aplicada por: Ussiri *et al.*, 2006 (**FD**, cálculo en base a una profundidad fija de suelo).
- 2- *Formulaciones que incluyen correcciones por masa equivalente de suelo* como las propuestas por: Andriulo *et al.*, 2008 (**MF2500**, cálculo para una masa fija de suelo de 2500 Mg); Solomon *et al.*, 2002 (**ESL**, cálculo en base a una profundidad equivalente de suelo del área cultivada respecto

al área de referencia sin disturbar por el hombre); y Sisti *et al.*, 2004 (**ESM**, en base a una masa equivalente de suelo).

- 3- *Métodos gráficos en coordenadas*: como los propuestos por Gifford & Roderick, 2003 (**CMC**, cálculo en base a un sistema coordinado de masas acumuladas) y por McBratney & Minasny, 2010 (**SCM**, en base a un sistema coordinado de material considerando C y material mineral).

A fin de determinar el método más adecuado para los suelos bajo estudio, se evaluó el impacto que tienen los cambios de D_a sobre los stocks de C calculados bajo los diferentes métodos.

Se efectuó una simulación, partiendo de datos promedios de D_a y C correspondientes a una situación original sin disturbio antrópico, manteniendo las concentraciones de carbono constantes y aumentando las D_a un 15, 30, 50, 70 y 90% (tiempo=1), respecto a la D_a correspondiente a la condición original (tiempo=0) simulando una densificación debida al uso del suelo (Tabla 6.1).

Para el cálculo del SC original, se aplicó el método FD. Se consideró que el método más conveniente para el cálculo del SC en suelos con disturbio antrópico, sería aquel que otorgue valores iguales o más aproximados a los stocks originales, es decir aquel que menos influenciado esté por la D_a .

Una vez seleccionado el método de cálculo que presentó menor influencia de la D_a , se procedió a determinar los stocks de carbono para los distintos sistemas bajo estudio: yerba mate, citrus, tabaco y selva subtropical.

Tabla 6.1: Simulación basada en las medias para C y Da correspondientes a la situación original (Da_0), manteniendo constantes las concentraciones de C e incrementando 15, 30, 50, 70 y 90% la Da respecto a la Da_0 simulando una compactación del suelo. $n=3$.

Prof.(m)	Tiempo=0		Tiempo =1					
	CC	Da_0	CC	Da_0	Da_0	Da_0	Da_0	Da_0
	(g C kg ⁻¹ suelo)	(Mg m ⁻³)	(g C kg ⁻¹ suelo)	+15%	+30%	+50%	+70%	+90%
				Mg m ⁻³				
0-0,10	40,32	0,750	40,32	0,862	0,974	1,124	1,274	1,424
0,10-0,20	21,75	0,809	21,75	0,931	1,052	1,214	1,376	1,537
0,20-0,30	17,45	0,819	17,46	0,942	1,064	1,228	1,392	1,556
0-0,10	40,32	0,719	40,32	0,827	0,935	1,078	1,222	1,366
0,10-0,20	21,75	0,770	21,75	0,886	1,001	1,156	1,310	1,464
0,20-0,30	17,45	0,794	17,46	0,913	1,033	1,191	1,350	1,509
0-0,10	40,32	0,717	40,32	0,824	0,932	1,075	1,218	1,362
0,10-0,20	21,75	0,773	21,75	0,889	1,005	1,160	1,314	1,469
0,20-0,30	17,45	0,862	17,46	0,991	1,121	1,293	1,465	1,638
0-0,30	26,51		26,51					

Tiempo=0 suelo original; Tiempo=1 suelo cultivado; CC: concentración de carbono.

Análisis estadístico: los resultados de SC, obtenidos a partir de la aplicación de los distintos métodos de cálculo, fueron analizados mediante ANOVA, aplicando el Test LSD ($p < 0,05$) para las comparaciones de medias. Los datos fueron procesados mediante el programa estadístico Infostat 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

6.2.4 Resultados y discusión

Los SC obtenidos a partir de la simulación y la aplicación de los distintos métodos figuran en la Tabla 6.2.

Se observó que a excepción del método ESL que se mostró libre de la influencia de la Da , todos los métodos en mayor o menor medida sobrestimaron el SC, es decir que fueron afectados por los cambios en la Da .

Tabla 6.2: Stocks de carbono simulados (Mg C ha^{-1}) para una profundidad de 0 a 0,30 m sobre la base de: una masa equivalente de suelo (ESM), una profundidad de suelo equivalente (ESL), una masa de suelo a una profundidad fija (FD), una masa fija de suelo de 2500 Mg (MF2500), un sistema de material coordinado considerando la masa mineral (SCM), un sistema coordinado considerando una masa seca de suelo acumulada (CMC), cuando el suelo es cultivado y sufre incrementos en su Da. $n=3$

Stock C										
Tiempo=0 60,82a										
(1,26)										
Tiempo=1 Simulación										
Método	Da₀+ 15%		Da₀+ 30%		Da₀+ 50%		Da₀+ 70%		Da₀+ 90%	
	Stock C	Dif.** medias	Stock C	Dif. medias	Stock C	Dif. medias	Stock C	Dif. medias	Stock C	Dif. medias
ESM	64,5b		67,5c		71,53d		75,53e		79,5f	
	(0,59)	-3,7	(0,66)	-6,7	(0,66)	-10,7	(0,87)	14,7	(0,97)	18,7
ESL	61,9a		61,9a		61,96a		61,96a		61,9a	
	(1,29)	-1,1	(1,29)	-1,1	(1,29)	-1,1	(1,29)	-1,1	(1,29)	-1,1
FD	69,9b		79,0c		91,2d		103,4e		115,5f	
	(1,45)	-9,1	(1,64)	-18,2	(1,88)	-30,4	(2,13)	42,5	(2,38)	54,7
MF2500	66,6b		69,6c		73,6d		77,6e		81,6f	
	(0,59)	-5,8	(0,67)	-8,8	(0,77)	-12,8	(0,87)	16,8	(0,97)	20,8
SCM	74,3b		74,8bc		75,4cd		76,0de		76,7e	
	(0,23)	13,48	(0,23)	14,03	(0,23)	-14,6	(0,23)	15,2	(0,55)	15,9
CMC	69,9b		71,60c		73,53d		75,18e		78,16f	
	(0,38)	-9,16	(0,38)	10,77	(0,43)	12,70	(0,49)	14,3	(1,54)	17,3

†Números entre paréntesis corresponden a desvíos estándares; letras iguales no son significativamente diferentes a $p < 0,05$.

‡Tiempo=0 suelo original; Tiempo=1 suelo cultivado; **: las diferencias de medias fueron determinadas como la diferencia en el Stock de carbono entre tiempo=0 y tiempo=1; Dao: densidad aparente original; BDo+15%,..., BDo+90%: simulación de los incrementos de las Da por efecto del uso del suelo.

Los stocks calculados a partir del método FD, sufrieron las mayores variaciones, con incrementos del 15, 30 50 70 y 90 % en la Da, el SC aumentó en igual proporción respecto a la condición original. Si se aceptara un 5% de error, el método FD podría ser utilizado sin riesgo de que existan sobrestimaciones del SC, sólo cuando las variaciones en las Da de las situaciones a comparar sean $\leq 5\%$.

Los SC calculados en base al método SCM, sufrieron las menores fluctuaciones por efecto de la Da.

Los métodos que emplearon correcciones de masa de suelo (ESM, MF2500, CMC) presentaron situaciones intermedias entre los resultados obtenidos por FD y SCM.

Por lo tanto en caso de existir diferencias significativas entre las Da de los distintos sistemas cuyos SC se quieran comparar, sería recomendable aplicar los métodos ESL (Solomon *et al.*, 2002) ó SCM (McBratney & Minasny, 2010).

En el presente estudio, se observaron incrementos en las Da por efecto del uso del suelo con respecto a la situación prístina (selva), variando entre el 20% (yerba mate) y el 48% (tabaco), en el orden $Ta > Ci > Yc > Sv$, con diferencias significativas (Tabla 6.2). Los SC de los distintos sistemas, fueron calculados entonces mediante la aplicación de los métodos ESL y SCM, obteniéndose los resultados que se observan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Valores medios de stock de carbono de 0 a 0,30 m calculados a partir de la aplicación del método basado en una profundidad de masa equivalente (ESL) y del método gráfico basado en coordenadas de material mineral y de C (SCM), en los sistemas selva subtropical (Sv), cultivo de citrus (Ci), tabaco (Ta) y yerba mate (Yc). n=48.

	SC^o	CC	Da
Tiempo=0	(Mg C ha ⁻¹)	(g C kg ⁻¹ suelo)	(Mg m ⁻³)
0-0,30 m	62,08A	26,51a	0,792A
Tiempo=1	Ci	Ta	Yc
Da (Mg m ⁻³)	1,095C	1,176D	0,953B
CC(g C Kg ⁻¹ Soil)	17,70b	17,08b	16,08b
	SC		
ESL (Mg C ha⁻¹)	42,10B	40,73B	38,42B
	(5,46)	(6,34)	(3,69)
SCM (Mg C ha⁻¹)	47,52B	44,44BC	39,48C
	(7,46)	(6,33)	(4,09)

†Números entre paréntesis corresponden a desvíos estándares; letras iguales no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

‡Tiempo=0 suelo original; Tiempo=1 suelo cultivado. **SC^o**: stock de carbono original (selva); **CC**: concentración de carbono; **Da**: densidad aparente; **SC**: stock de carbono en suelos cultivados.

En ambos casos (ESL y SCM), los suelos bajo uso agrícola, presentaron menores stocks de carbono respecto a la situación original (62,08 Mg C ha⁻¹).

El método ESL, sólo permitió distinguir entre suelos prístinos y suelos con disturbio antrópico. El método SCM resultó más sensible al cambio en el uso del

suelo, distinguiendo suelos no disturbados, de disturbados; y dentro de éstos, diferenció distintos usos agrícolas.

Por lo expuesto el método SCM, sería el más recomendable a aplicar cuando la finalidad del estudio sea como en este caso la evaluación de la calidad del suelo, en tanto que el método ESL sería recomendable para inventarios de C.

El **stock de carbono calculado por SCM**, indicó que los tres sistemas de cultivo produjeron pérdidas del 23 al 36% comparado con el stock de C original, en el orden: **Sv>Ci≥Ta≥Yc**.

Brown & Lugo (1990), encontraron pérdidas de C por efecto del uso del suelo, del orden del 10 al 55 % respecto a suelos bajo selva tropical; en tanto que Silva *et al.* (1994), informaron pérdidas del 41 al 80% en áreas de Cerrado bajo labranza convencional.

Los menores SC bajo suelos agrícolas, fue atribuido a una mayor tasa de descomposición cuando el suelo es disturbado, ya que el cultivo continuo favorece una rápida mineralización de la materia orgánica alterando la condición original (Trasar-Cepeda *et al.*, 2008).

Por lo expuesto, se aceptan las dos hipótesis arriba planteadas (Item 6.2.2).

6.3 RELACIONES ENTRE INDICADORES QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS COMO ÍNDICES DE CALIDAD

Para evaluar la CS, se pueden también establecer numerosos índices y relaciones vinculadas a la MO, en los que participan indicadores como la MOP, la respiración del suelo (Res), el nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm) y el CO.

Dentro de las relaciones se pueden mencionar: MOP/MOT (Píccolo *et al.*, 1998; Galantini *et al.*, 2004; 2008); Npm/MOP; MOP/Res (Toledo *et al.*, 2013); el Índice de labilidad (IL), el índice de reserva de carbono (IRC), y el índice de manejo del carbono (IMC) aplicados por Blair *et al.* (1995); como así también el índice de estratificación del carbono orgánico del suelo (CO) y el índice de

estratificación del nitrógeno potencialmente mineralizable (Npm) propuestos por Franzluebbbers, 2002.

Todos estos índices de orden químico y biológico se encuentran vinculados a la MO, y fueron aplicados para evaluar el funcionamiento y la calidad del sistema suelo, considerando que la materia orgánica es el indicador universal, esencial para el control de la erosión, favorece la infiltración y la conservación de nutrientes (Franzluebbbers, 2002; Nieto *et al.*, 2012), y de gran influencia en las funciones del suelo, en su calidad, y en la productividad (Galantini & Rosell, 2006; Shukla *et al.*, 2004); destacándose también por sus funciones ambientales, entre ellas captura de carbono y calidad del aire (FAO, 2002).

En suelos tropicales o subtropicales con arcillas de baja actividad (Kandita) caracterizados por una baja capacidad de intercambiar cationes, la MO es de especial interés ya que la CIC aumenta en función de su contenido, asimismo la MO puede mejorar la disponibilidad de elementos como el fósforo e inhibir la toxicidad de elementos como el aluminio (Al) por la formación de quelatos u otras uniones (Robert 1996 *Cit.* FAO, 2002).

La materia orgánica total (MOT), está compuesta por diferentes fracciones, la más lábil ó fácilmente mineralizable es la materia orgánica particulada (MOP), constituida por una mezcla de residuos de plantas y animales en diferentes etapas de su transformación, incluyendo también microorganismos, esporas, polen, semillas, fitolitos y residuos carbonizados (Spycher *et al.*, 1983; Baisden *et al.*, 2002). Representa una fuente importante de nutrientes disponibles en el corto y mediano plazo, siendo la relación MOP/MOT, un importante indicador del efecto de las prácticas agrícolas que modifican el aporte de carbono o su velocidad de descomposición (Galantini *et al.*, 2004; Noellemeyer *et al.*, 2006).

Índice de labilidad (IL): relaciona el carbono lábil respecto al no lábil y su proporción respecto a la misma relación en la condición original del suelo.

Índice de manejo del carbono (IMC): considera la labilidad de la reserva de carbono que hay en el suelo.

Índice de reserva de carbono (IRC): indica la proporción del carbono que quedó en el suelo respecto a la reserva original contenida en suelos bajo condición prístina.

Índices de estratificación COSr_1 y COSr_2 corresponden a la relación de la cantidad de carbono orgánico (CO) entre las distintas profundidades consideradas e indica la distribución del material orgánico en los primeros 0,30 m del perfil del suelo.

Índice de estratificación Npmr_1 : corresponde a la relación de la proporción de N respecto del nitrógeno total entre las distintas profundidades, que podrá ser mineralizado en el corto plazo a formas disponibles para las plantas.

Índice MOP/MOT: señala la proporción de la materia orgánica total que resulta más fácilmente descomponible o mineralizable y que suministrará nutrientes en el corto y mediano plazo.

Índice Npm/MOP : indica el potencial del suelo de suministrar N a los vegetales a partir del material orgánico más fácilmente descomponibles.

Índice MOP/Res : está asociado a la susceptibilidad a la degradación biológica del material más lábil del suelo, y ligado a la velocidad de ciclado de la MO y a la disponibilidad de nutrientes.

6.3.1 Objetivo

Evaluar el efecto del uso del suelo, a partir de la aplicación de Índices y relaciones entre parámetros de orden químico y biológico, y estrechamente relacionados con la materia orgánica.

6.3.2 Materiales y métodos

Para el cálculo de los distintos índices se utilizaron datos de las variables correspondientes a los sistemas de la etapa I, descritos en el Cap. 2: selva subtropical (Sv), cultivo de yerba mate (Yc), cultivo de tabaco (Ta) y cultivo de citrus (Ci).

Las relaciones MOP/MOT, Npm/N, y MOP/Res se establecieron para los primeros 0,10 m. Las formulaciones para obtener las relaciones de estratificación del carbono orgánico del suelo (COSr₁; COSr₂), y del nitrógeno potencialmente mineralizable (Npmr₁); el índice de labilidad (IL), el índice de reserva de carbono (IRC) fueron descriptas en el Cap. 2.

Análisis estadístico: los resultados obtenidos fueron analizados mediante un ANOVA, aplicando el Test LSD ($p < 0,05$) para las comparaciones de medias.

Para evaluar las relaciones entre variables, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre pares de variables ($p < 0,05$). Los datos fueron procesados mediante el programa estadístico Infostat 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

6.3.3 Resultados y discusión

Los valores obtenidos para los distintos índices se pueden observar en la Tabla 6.4. Todos los índices indicaron que los suelos bajo selva, presentaron una alta calidad en tanto que los suelos bajo yerba, presentaron la menor calidad de suelo.

Tabla 6.4: Índices funcionales obtenidos a partir de formulaciones preexistentes y relaciones generadas en esta Tesis, a partir de datos provenientes de los sistemas de la etapa 1: selva subtropical (Sv), cultivo de citrus (Ci), cultivo de yerba mate (Yc) y cultivo de tabaco (Ta).

Índices	Sv	Ci	Ta	Yc
IRC	1,00a	0,58b	0,54b	0,47c
IL	1,00a	1,13a	0,46b	0,44b
MOP/MOT	0,20a	0,22a	0,10b	0,10b
Npm/N	0,04a	0,03b	0,02c	0,01c
MOP/Res	0,30a	0,35a	0,15b	0,12b
COSr ₁	2,31a	1,89b	1,60c	1,29d
COSr ₂	1,85a	1,37b	1,34b	1,11c
Npmr ₁	2,27a	1,41b	2,39a	2,36a

La relación de estratificación del carbono COSr₁, señaló que los suelos bajo sistemas prístinos (Sv), presentaron una mayor estratificación y por tanto una mayor calidad. Este índice, resultó el más sensible de todos, distinguiendo los cuatro sistemas e indicando el siguiente orden de calidad: Sv>Ci>Ta>Yc.

6.3.3.1 Índice de labilidad (IL): señaló que los suelos que sufrieron remoción (Ta y Yc) presentaron menor proporción de carbono lábil respecto al no lábil, lo cual se asoció a una mayor mineralización incentivada por las labranzas y a que en estos cultivos, el producto de cosecha es el material foliar.

6.3.3.2 Índice de reserva de carbono (IRC): indicó la proporción del carbono que quedó en el suelo respecto a la reserva original (Sv). Señaló que todos los sistemas agrícolas provocaron pérdidas de carbono respecto a la situación original, siendo el uso yerbatero el más degradante.

6.3.3.3 Índice MOP/MOT: señaló que del total de la MO entre un 10 y un 22% corresponde a la fracción más activa, la cual participa fundamentalmente en la disponibilidad de nutrientes a corto plazo y contribuye a la estructura del suelo (Bouajila & Gallali, 2010). Los suelos bajo uso yerbatero y tabacalero, produjeron pérdidas de MOP de un 50% respecto de la condición original. El índice presentó diferencias significativas entre usos de suelo, indicando una mayor proporción de material orgánico particulado en suelos sin disturbar por el hombre (Sv) y en suelos bajo cultivo perenne sin remoción (citrus) y menores valores en suelos agrícolas bajo cultivo de tabaco y de yerba, lo cual fue atribuido a que en ambos el producto de la cosecha son las hojas por cuanto el material vegetal que puede volver al suelo es menor. En regiones subtropicales, los suelos bajo Sv, reciben un constante aporte de MO no sólo desde la hojarasca sino también por la gran abundancia de raíces y raicillas que se renuevan constantemente (Dalurzo *et al.*, 2005) y una mayor acumulación de material vegetal en los primeros centímetros del perfil, favorece la acumulación principalmente de material particulado (Eiza *et al.*, 2005).

Cabe destacar también que los suelos bajo yerba y tabaco, han sufrido en el primer caso, remoción anual por las labranzas y en el segundo una remoción periódica por uso de rastras de discos en el combate contra las malezas.

Estos resultados mostraron que si bien en los suelos cultivados disminuyó la MOP, también lo hizo la MO, manteniéndose la proporción que existía en suelos bajo condición original, de manera que la degradación producida por el uso fue de magnitud proporcionalmente semejante en las dos fracciones consideradas. Las variaciones en la proporción de MOP, permitieron inferir acerca del enriquecimiento o pérdida de MO en suelos sometidos a diferentes manejos, así valores bajos del índice MOP/MOT para yerba mate, indicaron condiciones muy favorables para la transformación del material orgánico que ingresa al suelo (Galantini *et al.*, 2008).

Píccolo *et al.* (1998) en suelos de Misiones bajo selva y bajo yerbales de 50 años, encontraron valores de 35 y 26 % respectivamente, destacando que bajo el agroecosistema yerbatero observó una destrucción de la MOP y un consecuente incremento del pool orgánico asociado a la fracción mineral.

6.3.3.4 Índice Npm/N: este índice resultó sensible para diferenciar usos de suelo, siendo mayor el potencial de mineralizar nitrógeno en suelos de alta calidad. La medición de la mineralización del nitrógeno es una medida de calidad de suelo, así suelos con alto potencial de mineralización del N tiende a ser de naturaleza fértil, en tanto que suelos con bajo potencial tienden a ser menos fértiles y requieren grandes aportes de MO (Deenik, 2006). El índice señaló el siguiente orden de calidad Sv>Ci>Yc y Ta. Así, la menor proporción del nitrógeno total del suelo que es potencialmente disponible para las plantas en el próximo ciclo de cultivo correspondió a los suelos con menor proporción de material fácilmente descomponible (Ta y Yc).

6.3.3.5 Índice MOP/Res: La respiración (Res) es un estimativo de la actividad microbiana del suelo y de la mineralización del carbono orgánico del suelo (Gamma-Rodrigues *et al.*, 2008) y la relación MOP/Res está asociada a la susceptibilidad a la degradación biológica del material más lábil del suelo, y ligada a la velocidad de ciclado de la MO y a la disponibilidad de nutrientes. Este

índice al igual que el índice MOP/MOT, presentó diferencias significativas entre usos de suelo, indicando una mayor proporción de material orgánico particulado en suelos sin disturbar por el hombre (Sv) y en suelos bajo cultivo perenne sin remoción (citrus) y menores valores en suelos agrícolas bajo cultivo de tabaco y de yerba. Esto indica que no sólo difieren en cantidad de MOP sino también en la dinámica de su descomposición, resultando la MO bajo selva y citrus con un ciclado más lento que los suelos con remoción. Las labranzas incrementan la mineralización del CO y favorecen la respiración del suelo (Balesdent *et al.* 2000).

6.3.3.6 Índices de estratificación

Índice de estratificación COSr₁: los suelos sin disturbar, presentaron la mayor estratificación de carbono, con un índice medio superior a 2, en tanto que los suelos agrícolas, presentaron índices COSr₁<2 (Fig. 6.1). Estos valores coincidieron con lo encontrado por Franzluebbers (2002), quien informó que independientemente del tipo de suelo y del régimen climático, valores de los índices de estratificación de COS>2 indicarían que se está proveyendo de calidad al suelo y valores <2 corresponderían a suelos bajo condiciones de degradación. Nieto *et al.* (2012) determinaron índices COSr₁<2 para suelos bajo labranza convencional, y >2 para suelos bajo cultivos de cobertura y bajo labranza cero y asociaron estos dos últimos manejos a una mayor calidad de suelo y a un mayor potencial para secuestrar carbono. El índice permitió distinguir los cuatro sistemas evaluados, señalando el siguiente orden de calidad de suelo: Sv>Ci>Ta>Yc.



Fig. 6.1: Relaciones de estratificación del COSr₁ bajo los diferentes tratamientos en Oxisoles de Misiones. Sv: selva subtropical; Ci: citrus; Ta: tabaco y Yc: yerba mate.

Índice de estratificación COSr₂: fue desarrollado en esta tesis a partir del índice de estratificación de carbono propuesto por Franzluebbers (2002), pero con una modificación en las profundidades consideradas ya que se relacionaron los primeros centímetros del perfil (0-0,10 m) con la profundidad sub-superficial (0,10-0,20m). En este caso el índice aplicado resultó menos sensible que el anterior, distinguiendo suelos prístinos de cultivados y dentro de éstos señaló al sistema bajo yerba como el de menor calidad con una situación intermedia para los sistemas Ci y Ta (Fig. 6.2).



Fig. 6.2: Relaciones de estratificación del COSr₂ bajo los diferentes tratamientos en Oxisoles de Misiones. Sv: selva subtropical; Ci: citrus; Ta: tabaco y Yc: yerba mate.

El valor del índice COSr_2 hallado para suelos climax fue $>1,5$ y para suelos cultivados fue $<1,5$. Ciertamente se necesitarán más investigaciones, pero estos valores menores a 1,5 indicarían pérdidas de calidad debido al uso agrícola. Valores similares fueron encontrados para suelos prístinos y suelos agrícolas bajo cultivo maíz con labranza convencional y cultivo de té en Oberá, Misiones (Toledo *et al.*, 2013). Moraes Sá & Lal (2009) determinaron en Oxisoles, índices de estratificación de COS relacionando distintas profundidades, comparando suelos bajo 22 años de labranza convencional y suelos bajo vegetación natural, y concluyeron que todos los índices disminuyeron respecto a la situación natural, y lo atribuyeron a la ruptura de los agregados y la consecuente exposición de la MO a los procesos microbianos.

El índice de estratificación de COS, aumentó con el aumento de la profundidad considerada para su cálculo, siendo mayores los valores de COSr_1 respecto a COSr_2 , en coincidencia con lo hallado en Oxisoles por Moraes Sá & Lal (2009).

Índice de estratificación del nitrógeno potencial (Npmr_1): este índice no resultó sensible para distinguir suelos prístinos de suelos agrícolas, tampoco distinguió suelos fertilizados (Ci y Ta) de no fertilizados (Yc).

6.4 CONCLUSIONES

- El stock de carbono resultó menos afectado por los cambios en la Da y más sensible al uso del suelo, cuando fue calculado por el método gráfico SCM propuesto por McBratney & Minasny (2010). Los tres sistemas de cultivo produjeron pérdidas del 23 al 36% respecto al stock de C original.
- La deforestación y el posterior cultivo del suelo con tabaco y yerba mate, en los que el producto de cosecha son las hojas, produjeron disminuciones considerables del material fácilmente descomponible y afectaron la dinámica de su descomposición, favoreciendo un ciclado más rápido de la MO.

- Los índices químicos y biológicos determinados a partir de formulaciones preexistentes, señalaron al sistema yerba convencional como el más degradante.
- Las relaciones de estratificación del COS están positivamente asociadas a la calidad de suelo. Tasas de $COSr_1 > 2$ y $COSr_2 > 1,5$ corresponden a situaciones de alta calidad de suelo, en tanto que valores menores están asociados a procesos de degradación denotando pérdidas de calidad en Oxisoles bajo los diferentes sistemas de cultivo evaluados.
- El índice de estratificación $COSr_1$ y el stock de carbono, resultaron más sensibles para distinguir usos de suelo, indicando que todos los sistemas agrícolas bajo estudio produjeron pérdida de calidad, coincidiendo con lo señalado por los índices: “Fertilidad” (IQ-30-1) y “Actividad biológica” (IB-30-1), desarrollados en la presente Tesis a partir de la aplicación de técnicas multivariadas (ACP).

PARTE IV: CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES E IMPACTO

7.1 CONCLUSIONES GENERALES

En la presente Tesis, se desarrolló una propuesta metodológica que permite el diagnóstico, la cuantificación y el monitoreo de la calidad de los suelos. La misma se basa en la aplicación de técnicas estadísticas uni y multivariadas para el desarrollo de índices de calidad y para su posterior validación; como así también el empleo de relaciones entre indicadores y formulaciones preexistentes para el estudio del efecto del cambio en el uso de las tierras, los sistemas de cultivo, las prácticas agronómicas y el manejo sobre este recurso no renovable: el suelo.

- ❖ La metodología propuesta para la obtención de índices de calidad y su validación, ha sido oportuna, efectiva, y válida.
- ❖ El cálculo de stock de carbono en Oxisoles, permitió conocer su potencial de secuestro de carbono, aportando información válida vinculada a los Gases de efecto invernadero (GEI) necesaria para la toma de decisiones en Programas de investigación, de desarrollo y de inversiones orientados a conservar el recurso suelo y la calidad ambiental. El Stock de carbono, resultó sensible para distinguir el impacto de los distintos usos de suelo, estableciendo que los suelos cultivados se encuentran en vías de degradación, señalando el siguiente orden de calidad: $S_v > C_i \geq T_a \geq Y_c$.
- ❖ Los índices desarrollados por Análisis de Componentes Principales, aportaron mayor información respecto del impacto de los distintos sistemas de cultivo sobre la calidad del suelo, resultando más sensibles y permitiendo distinguir mayores diferencias entre tratamientos.

- ❖ De los seis índices desarrollados por ACP y calibrados, tres resultaron válidos para ser aplicados en Oxisoles bajos sistemas agrícolas y forestales con fines de diagnóstico y monitoreo de la calidad del suelo:
 1. índice de “Agregación” (IF-30-1),
 2. índice de “Fertilidad” (IQ-30-1) y
 3. índice de “Actividad biológica” (IB-30-1).

- ❖ El índice de “Agregación” (IF-30-1), señaló que todos los sistemas de cultivos impactaron negativamente sobre la calidad física del suelo, señalando al sistema bajo labranza convencional (cultivo anual de tabaco) como el más degradante, estableciendo el siguiente orden de calidad: $Sv > Yc > Ci > Ta$.

- ❖ El índice de calidad “Fertilidad” (IQ-30-1) señaló que todos los sistemas evaluados produjeron una pérdida de fertilidad del suelo, aunque en menor medida cuando fueron fertilizados y encalados (citrus y tabaco), determinando el siguiente orden de calidad: $Sv > Ci = Ta > Yc$.

- ❖ El Índice de “Actividad biológica” (IB-30-1) señaló que biológicamente, los suelos que se encuentran bajo cultivos como yerba y tabaco, en los que el objeto de cosecha son las hojas se parecen impactando en la calidad y cantidad de residuos que regresan al suelo, determinando el siguiente orden de calidad biológica: $Sv > Ci > Ta = Yc$.

- ❖ Los índices validados podrán ser aplicados para cuantificar calidad de suelos y monitorear su dinámica, siempre y cuando los valores de los distintos indicadores de calidad que los componen, se encuentren dentro de los límites de calibración para los que fueron desarrollados.

7.2 IMPACTO ESPERADO

La aplicación de los índices de calidad desarrollados, calibrados y validados en esta Tesis, constituyen una herramienta válida para el estudio y la cuantificación de la calidad de los suelos subtropicales rojos, y la evaluación del manejo y uso de las tierras con un paradigma de sustentabilidad.

Otorgan información básica y aplicada, para el desarrollo de políticas agropecuarias y forestales más convenientes y amigables con el ambiente, posibilitando el monitoreo y la planificación del uso del suelo con un objetivo de conservación y en vistas de una mejora de la calidad ambiental.

Es una herramienta científica-básica que podrá ser aplicada por diferentes áreas del conocimiento como: edafología, conservación y manejo de suelos, áreas medioambientales, agro-ecología y agricultura de zonas tropicales; posibilitando entre otros:

- Efectuar una evaluación científica de los beneficios y perjuicios de los sistemas y técnicas de cultivo empleadas.
- Evaluar el impacto de la introducción de un nuevo cultivo, de una nueva práctica agronómica o diferente manejo del suelo, el desplazamiento de un cultivo de una zona a otra sobre la calidad del suelo y la calidad ambiental.
- Comparar diferentes sistemas de cultivo, de producción, diferentes manejos de suelo, permitiendo identificar aquellos provean al suelo de calidad física, química y/o biológica.
- Evaluar el riesgo de un determinado sistema en el tiempo, posibilitando seleccionar sistemas de producción de cultivos con menor impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abeyasekera, S. 1995. Multivariate methods for index construction. In: Krzanowski WJ & FHC Marriott. *Multivariate Analysis, Part II*. London. 280 pp.
- Abril, A & L Noé. 2007. Balance de carbono del suelo según el uso de la tierra en la región árida - semiárida central de Argentina. Pp. 169-182. En: J. Gallardo Lancho (ed.). *La Captura de Carbono en Ecosistemas Terrestres Iberoamericanos*. Red Iberoamericana de física y química ambiental. Sociedad Iberoamericana de física y química ambiental, Salamanca, España. *Adv. Agr.* 74: 1-40.
- Acton, DF & GA Padbury. 1993. A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. Pp. 2-10. In: *A program to assess and monitor soil quality in Canada: Soil quality evaluation summary*. Res. Branch, Agric. Canada, Ottawa, ON.
- Albanesi, AS. 2001. Parámetros de calidad biológica del suelo para evaluar degradación en función del uso de la tierra en una zona del Chaco semiárido, Argentina. Tesis de Maestría de la Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Almenara-Barrios, J; C García-Ortega; JL González-Caballero & MJ Abellán-Hervás. 2002. Creación de índices de gestión hospitalaria mediante análisis de componentes principales. *Salud pública de México*, 44 (6): 533-540.
- Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century model. *Soil Use Manage.* 17: 62-66.
- Amado, TJC; C Bayer; PC Conceição; E Spagnollo; B Costa de Campos & M da Veiga. 2006. Potential of carbon accumulation in no till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35: 1599-1607.
- Amador, JA; Y Wang; MC Savin & JH Gorres. 2000. Fine-scale spatial variability of physical and biological soil properties in Kingston, Rhode Island. *Geoderma* 98: 83-94.
- Anderson, JO & KH Domsch. 1975. Measurement of bacterial fungal contribution to respiration on selected agricultural and forest soil. *Can. J. Microbiol.* 21: 314-322.
- Andrews, SS; DL Karlen & CA Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 68:1945-1962.
- Andrews, SS; DL Karlen & JP Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25-45.
- Andriulo, A; MC Nasal; AB Irizar; SB Restovich & F Rimatori. 2008. Efecto de diferentes sistemas de labranza, secuencias de cultivo y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. Pp. 117-129. En: JA Galantini; L Suñer; MR Landriscini & JO Iglesias (eds.). *Estudio de las Fracciones Orgánicas en Suelos de la Argentina*. Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires.

- Angers, DA & C Chenu. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. In: R Lal; JM Kimble; RA Follett & BA Stewart (eds.). Soil processes and the carbon cycle. CRC Press, Boca Raton, FL. Chapter 14, Pp. 199-206.
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil & Tillage Research* 96: 155-165.
- Argüelles-Cárdenas, JH. 1990. Selección de variables en cebada mediante el análisis de componentes principales. *Revista ICA, Colombia* 25 (4): 355-365.
- Arshad, MA & GM Coen. 1992. Characterization of soil quality. Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
- Arshad, MA & S Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88: 153-160.
- Astier-Calderón, M; M Maass-Moreno & J Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5):605-620.
- Bachmeier, OA & Rollán. 2004. Mineralización de nitrógeno en un Haplustol Típico: efecto de los años de agricultura y de la humedad edáfica. *Ciencia del Suelo* 22 (2) 64-72.
- Baisden, WT; R Amundson; DL Brenner; AC Cook; C Kendall & JW Harden. 2002. A multi-isotope C and N modeling analysis of soil organic matter turnover and transport as a function of soil depth in a California annual grassland soil chronosequence. *Global Biogeochemical Cycles* 16(4): 1135. http://nature.berkeley.edu/~earthy/Ronald_Amundson/Research_Publications_files/Global%20Biogeochem.%20Cycles%202002%20Baisden-5-1.pdf. Fecha último acceso: 30/03/2012.
- Balesdent, J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.
- Bastida, F; Moreno JL; Hernández T & C García. 2006. Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 3463-3473.
- Bastida, F; A Zsolnay; T Hernández & C García. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147: 159-171.
- Bedford, BL; MR Walbridge & A Aldous. 1999. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands. *Ecology* 80: 2151-2169.
- Benintende, M; S Benintende; D David; S Sterren & M Saluzzio. 2010. Indicadores biológicos y bioquímicos: caracterización en suelos de Entre Ríos. *Actas XXII congreso Argentino de la Ciencia del suelo*, Rosario. Pp 80.
- Bertolami, F; J Bono; E Wabö; P Picchio; E Manghi; M Strada; MG Parmuch; M Stamati & C Montenegro. 2009. Superficie deforestada, destino de las áreas y características dasométricas de los bosques sustituidos en la región selva Misionera en el período 1998-2006. *II Jornadas Argentinas de Ecología de Paisajes*. CD.

- Blair, GJ; D Rod; B Lefroy & L Lisle. 1995. Soil Carbon Fractions Based on their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. *Aust. J. Agric. Res.* 46: 1459-1466.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Pycnometer Method. Pp. 377-381. In: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Boote, KJ; JW Jones & NB Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88: 704-716.
- Bouajila, A & T Gallali. 2010. Land use effect on soil and particulate organic carbon, and aggregate stability in some soils in Tunisia. *Afr. J. Agric. Res.* 5 (8): 764-774.
- Bradford, JM. 1986. Penetrability. In A Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* Pp. 468-471, ASA and SSSA, Madison, WI.
- Bramardi, S. 2009. Métodos de Análisis Multivariado, Curso de Posgrado. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste-Universidad Nacional de Comahue.
- Bredja, JJ; TB Moorman; DL Karlen & TH Dao. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2115-2124.
- Brejda, JJ; TB Moorman; JL Smith; DL Karlen; DL Allan & TH Dao. 2000b. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 974-982.
- Bremner, AE & CS Mulvaney. 1982. Total nitrogen. Pp. 595-624. In: Page *et al.* (ed.). *Methods of soil analysis Part 2.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Bronson, KF; TM Zobeck; TT Chua; V Acosta-Martinez; RS Van Pelt & JD Booker. 2004. Carbon and nitrogen pools of Southern High Plains cropland and grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1695-1704.
- Brown, S & A Lugo. 1990. Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant Soil* 124 (1) 53-64.
- Buol, SW. 1995. Sustainability of soil use. *Annual Review of Ecology and Systematic* 26: 25-44.
- Burger, JA & DL Kelting. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* 122: 155-166.
- Cabrera, AL. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, Vol. XIV, Nº 1-2. Pp 52.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Cambardella, CA & E Elliot. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1071-1076.

- Cambardella, CA; AM Gajda; JW Doran; BJ Weinhold & T Kettler. 1999. Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. In: R Lal, JF Kimble & RF Follet (eds). Carbon methods. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Campbell, CA & W Souster. 1982. Loss of organic matter and potentially mineralizable nitrogen from Saskatchewan soils due to cropping. Can. J. Soil Sci. 62: 651-656.
- Cantú, MP; A Becker; JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de los suelos mediante el uso de indicadores e índices. Ciencia del Suelo (Argentina) 25(2): 173-178.
- Cardoso Niero, LA; SC Falci Dechen; R Marques Coelho & I Clerici De Maria. 2010. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo vermelho distroférico com usos e manejos distintos. R. Bras. Ci. Solo, 34: 1271-1282.
- Carvalho, JLN; CE Pelegrino Cerri; BJ Feigl; MC Píccolo; V de P. Godinho; U Herpin & CC Cerri. 2009. Conversion of Cerrado into agricultural land in the south-western Amazon: Carbon stocks and soil fertility. Sci. Agric. 66: 233-241.
- Casierra-Posada, F & OE Aguilar-Avendaño. 2007. Stress for aluminum in plants: reactions in the soil, symptoms in plants and amelioration possibilities. A review. Revista Colombiana de Ciencias hortícolas 1(2): 246-257.
- Cavenage, A; MLT Moraes; MC Alves; MAC Carvalho; MLM Freitas & S Buzetti. 1999. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro sob diferentes culturas. R. Bras. Ci. Solo. 23: 997-1003.
- Chen, SK; CA Edwards & S Subler. 2003. The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms. Soil Biol. Biochem. 35: 9-19.
- Choné, T; F Andreux; JC Correa; B Volkoff; & CC Cerri. 1991. Changes in organic matter in an Oxisol from the Central Amazonian forest during eight years as pasture determined by ¹³C isotopic composition. In Berthelin, J. ed. Diversity of environmental biogeochemistry. Elsevier, Amsterdam. Pp. 397-405.
- Cosentino, DJ & C Chenu. 2008. Los microorganismos como controladores de la arquitectura del suelo. Cap. 8, Pp. 199. En: Fertilidad física de los suelos. Taboada M.A. & Álvarez C. (Eds.) 2ª Edición. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Costantini, A; D Cosentino & A Segat. 1996. Influence of tillage systems in biological properties of a typic Argiudoll soil under continuous maize in Central Argentina. Soil Till. Res. 38: 265-271.
- Cruz, AB; J Etchevers Barra; RF del Castillo & C Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas, 13(2): 90-97.
<http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572>.
Fecha último acceso: 17/12/13.
- Da Silva Martins, AL; E Gomes de Moura & JH Camacho Tamayo. 2010. Variabilidad espacial de la infiltración y su relación con algunas propiedades físicas. Ingeniería e Investigación, 30 (2): 116-123.

- Dalurzo, HC. 2002. Tesis Magíster Scientiae. "Agregado de residuos orgánicos en suelos ferralíticos. Efecto sobre variables que estiman sustentabilidad.". Escuela para Graduados Alberto Soriano. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Dalurzo, HC; DM Toledo; & S Vazquez. 2004. Actividad de la fosfatasa ácida con diferentes usos del suelo en Eutrudoxes Ródicos del sur de Misiones (Argentina). *Revista Venesuelos* 8(1): 24-28.
- Dalurzo, HC; DM Toledo & S Vazquez. 2005. Parámetros químicos y biológicos en Oxisoles con uso citrícola. *Ciencia del Suelo* (Argentina) 23(2): 159-165.
- Dalurzo, HC; S Vazquez & DM Toledo. 2006. Calidad de Suelos en Agroecosistemas de Misiones. En: A. Paz González (ed.). Bases para la conservación de suelos y aguas en la cuenca del Río Paraná. Pp. 109-117. Xunta de Galicia. España.
- Dalurzo, HC, S Vazquez, y S Ratto. 2002. Indicadores físicos de calidad de suelos en Oxisoles de Misiones (Argentina). *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas* 2002. Universidad Nacional del Nordeste. www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2002/cyt.htm. Área Agrarias. A-016.pdf. Fecha último acceso: 01/03/2013
- De Jong, E. 1981. Soil aeration as affected by slope position and vegetative cover. *Soil Sci.* 131: 34-43.
- De la Rosa, D. 2008. Evaluación agro-ecológica de los suelos para un desarrollo rural sostenible. Ediciones Mundi-Prensa. 404 pp.
- Deenik, J. 2006. Nitrogen mineralization potential in important agricultural soils of Hawaii. College of Tropical Agriculture and Human Resources (CTAHR), Soil and Crop Management. <http://www.ctahr.hawaii.edu/deenikj/Downloads/SCM-15.pdf>. Fecha último acceso: 27/04/2013.
- Dewis, J & F Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos Nº 10. FAO. Roma. Pp 36-57.
- 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.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. InfoStat, Versión 2011. Grupo InfoStat. FCA, UNC, Córdoba, Argentina.
- Dick, RP. 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: JW Doran; DC Coleman; DF Bezdicek & BA Stewart (eds). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA, Spec Pub nº35, Madison, Pp. 107-124.
- Dirección de Bosques. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina. Pp.10. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Dirección de Bosques. Unidad de manejo del sistema de evaluación forestal.
- Doran, JW & A Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assesing soil quality. In: *Defining soil quality for sustaninable environment*. J.W. Doran *et al.* (Eds.) SSSA Spec. Publ. 35. SSSA and ASA, Madison. WI, pp 3-21.

- Doran, JW & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America Special Publication, Vol. 49 Madison, WI. Pp. 25-37.
- Doran, JW; M Liebig; & DP Santana. 1998. Soil health and global sustentability. In *Proceedings of 16 th World Congress of Soil Science*, Montpellier, France. Pp. 20-26.
- Doran, JW; M Sarrantonio & R Janke. 1994. Strategies to promote soil quality and soil health. In: Pankhurst, *et al.* (Eds.), *Soil Biota: Management in Sustainable Farming Systems*. CSIRO, Vic., Australia. Pp. 230-237.
- Doran, JW & MR Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3-11.
- Drinkwater, LE; C Cambardella; JD Reeder & CW Rice. 1996. Potentially mineralizable nitrogen as an indicator of biologically active soil nitrogen. Pp. 217-230. In: Doran, JW & AJ Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Ebert, U & H Welch. 2004. Meagninful environmental indices a social choice approach. *Journal Environmental Economics and Managament* 47: 270-283.
- EEA (European Environment Agency). 2002. Toward and urban atlas. Assessment of spatial data on 25 European cities and urban areas. Copenhagen. Environmental Report Nº 30. 185 p.
- Eiza, MJ; N Fioriti; GA Studdert & HE Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 23(1): 59-67.
- Ellert, BH; HH Janzen & BG McConkey. 2001. Measuring and comparing soil carbon storage. p. 131-144. In R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, and B.A. Stewart (eds.). *Assessment Methods for Soil Carbon*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Erkossa, T; F Itanna & K Stahr. 2007. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Australian Journal of Soil Research* 45: 129-137.
- Espinosa, J & E Molina. 1999. *Acidez y encalado de los suelos*. International PlantNutrition Institute.
- <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos,%20libro%20por%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf>. Fecha último acceso: 13/09/2013.
- Etchevers, J; C Hidalgo; M Vergara; M Bautista & J Padilla. 2009. Calidad de suelo: Conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En: López-Blanco, J & M de L Rodríguez Gamiño. *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM Colección Geografía para el siglo XXI. Serie Libros de Investigación, nº 3. 196 p.
- Fabrizzi, KP; A Morón & FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.

- FAO. 1995. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. In: WG Sombroek & D Sims (Eds.), Land and Water Bulletin nº 2. Publications division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome.
- FAO. 1997. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas nº 8. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. 207p.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos basado en el trabajo de Michel Robert. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- Fassbender, HW & E Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina IICA. San José. Costa Rica. 420 p.
- Fernández, P; JA Luque & JD Paoloni. 1971. Análisis de la infiltración y su aplicación para diseños de riego en el Valle inferior del río Colorado. Revista de Investigaciones Agropecuarias, INTA. Bs. As.
- Fernández, R. 1987. Influencia del sistema Desmonte-Reforestación con *Pinus* spp. sobre algunas características químicas de los suelos. Ciencia del Suelo (Argentina) 5 (2): 123-129.
- Ferrary Laguzzi, F; R Osinaga; JL Arzeno & T Rodríguez. 2010. Fraccionamiento de la materia orgánica como indicador químico de calidad del suelo en distintos sistemas de labranzas. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Rosario. Pp 26.
- Ferreras, LA; G Magra; P Besson; E Kovalevski & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. Ciencia del Suelo (Argentina) 25(2): 159-172.
- Ferreras, LA; S Toresani; B Bonel; E Fernández; S Bacigaluppo; V Faggioli & C Beltrán. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. Ciencia del Suelo (Argentina) 27(1): 103-114.
- Forsythe, W. 1975. Física de Suelos. IICA. 212 p. San José. Costa Rica.
- Franco, TL & R Hidalgo. 2003. Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. Boletín técnico IPGRI nº 8. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Cali, Colombia. 89 p.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil & Tillage Res. 66: 95-106.
- Franzluebbers, AJ. 2005. Review: Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. Soil & Tillage Res. 83: 120-147.
- Franzluebbers, AJ. 2008. Linking soil and water quality in conservation agricultural systems. Electronic Journal of Integrative Biosciences 6(1):15-29. Arkansas State University.

- Galantini, JA & RA Rosell, 1997. Organic fractions, N, P and S changes in an Argentine semiarid Haplustoll under different crop sequences. *Soil Tillage Res.* 42: 221-228.
- Galantini, JA & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.*: 87: 72-79.
- Galantini, JA & L Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* Vol. XXV: 41-55.
- Galantini, JA; J Iglesias; M Landriscini; L Suñer & G Minoldo. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en suelos naturales y cultivados. En: J Galantini *et al.*, (eds.). Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Pp. 71-95. Editorial Universidad Nacional del Sur.
- Galantini, JA; N Senesi; G Brunetti & R Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Galvis-Spínola, A & T Hernández-Mendoza. 2004. Cálculo del nitrógeno potencialmente mineralizable. *Interciencia* 29: 377-383.
- Gamma-Rodrigues, EF & A Gamma-Rodrigues. 2008. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. En: G de Araújo Santos *et al.* (eds.). Fundamentos da matéria orgânica del solo. Ecosistemas Tropicales & Subtropicales. Porto Alegre. Brasil. Pp. 159-170.
- Gifford, RM & ML Roderick. 2003. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? *Globe Change Biol.* 9: 1507-1514.
- Gil-Sotres, F; C Trasar-Cepeda; MC Leirós & S Seoane. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 37: 877-887.
- Giuffré, L; L Basso & S Ratto. 2008. Indicadores ambientales y educación ambiental en función de la responsabilidad social empresarial. *Revista Facultad de Agronomía. UBA.* 28: 99-106.
- Giuffré, L; R Romaniuk; ME Conti & N Bartoloni. 2006. Multivariate evaluation of no-tillage system quality indicators in Argiudolls of Rolling Pampa (Argentina). *Biol Fert Soils* 42: 556-560.
- Godagnone, RE; RF Ferrao & EF Bogado. 1988. Carta de Suelos del Departamento de L.N. Alem. Provincia de Misiones. 76 pp.
- Godshalk, BE & HD Timothy. 1988. Factor and principal component analysis as alternative to index selection. *Theor. Appl. Genet.* 76: 352-360.
- González, M; A Segat & M Conti. 2000. Reacción del suelo. En: ME Conti, Principios de edafología, con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía. Pp. 216-228.

- González, MG; JF Gallardo; E Gómez; G Masciandaro; B Ceccanti & S Pajares. 2007. Potencial universal applicability of soil bioindicators: evaluation in three temperate ecosystems. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 25(2): 151-158.
- Gonzalez, RD; HC 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. www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/cyt.htm. Fecha último acceso: 1/03/2013.
- Grable, AR & EG Siemer. 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32: 180-186.
- Gregorich, EG; MR Carter; DA Angers; CM Monreal & BH Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-385.
- Hakansson, I & WB Voorhees. 1997. Soil compaction. In: R Lal; WH Blum; C Valentine & BA Stewart (eds.). *Methods for assessment of Soil Degradation*. Pp. 167-179.
- Haynes, RJ. 2005. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85: 221-268.
- He, ZL; XE Yang; VC Baligar & DV Calvert. 2003. Microbiological and biochemical indexing systems for assessing quality of soil acids. *Advances in Agronomy* 78: 89-138.
- Hevia G; D Buschiazzo; E Hepper; Urioste A; & E Antón. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma* 116: 265-277.
- Horn, R; H Domzal; A Slowinska-Jurkiewicz & C Van Ouwerkerk. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.*, 35: 23-36.
- Husson, F; S Lê & J Pagès. 2011. *Exploratory multivariate analysis by example using R*. Computer science & data analysis series. Taylor & Francis Group/CRC Press. Boca Raton, 228 pp.
- Imaz, MJ; I Virto; AE Bescansa; O Fernandez Ugalde & DL Karlen. 2010. Soil Quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil Till.Res.* 107: 17-25.
- INTA, 2009. Plan de Tecnología Regional 2009- 2012. Centro Regional Misiones. Documentos Institucionales. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 72 Pp. <http://inta.gob.ar/documentos/plan-tecnologico-regional-2009-2011-centro-regional-misiones.pdf>. Fecha último acceso: 20/02/2014.
- Jackson, JE. 2003. *A user's guide to principal components*. Wiley series in probability and statistics. Nueva York. John Wiley & Sons, Inc. USA
- Jackson, ML. 1970. *Análisis Químico de los Suelos*. Segunda Edición. Ediciones Omega. Barcelona, 662 pp.

- Janzen, HH; CA Campbell; EG Gregorich & BH Ellert. 1997. Soil carbon dynamics in Canadian agroecosystems.. In: Lal *et al.* (eds.). Soil processes and the carbon cycle. Pp 57-80. Advances in Soil Sci. CRC Press. Boca Raton.
- Janzen, HH; CA Campbell; RC Izaurralde; BH Ellert; N Juma; WB McGill & RP Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian Prairies. Soil Tillage Res. 47:181-95.
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. Mc Graw-Hill Publishers, New York, NY.
- Jhonson, RA & DW Wichern. 2007. Applied multivariate statistical analysis. Pearson education Inc. London, 767 pp.
- Johnson, DE. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. México: International Thomson Editores.
- Jorajuría, D. 1996. El tráfico vehicular, la compactación y la sostenibilidad de la producción de madera. In: Actas del Primer Seminario de Actualización en Sistemas de Cosecha y Transporte Forestal, 1996, El dorado. Pp. 45-50.
- Kapkiyai, J; N Karanja; J Qureshi; P Smithson & P Woormer. 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenian nitisol under long term fertilizer and organic input management. Soil Biol. Biochem. 31: 1773-1782
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RG Cline; RF Harris; & GE Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 4-10.
- Karlen, DL; SS Andrews & JW Doran. 2001. Soil quality: current concepts and applications. Advances in Agronomy, Volume 74: 1-39.
- Keeney, DR & RA Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. p. 643-698. In: Page *et al.* (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy monogr. Nº 9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Keller, T & I Håkansson. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. Geoderma 154: 398-406.
- Kemper, WD & RC Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. p. 425-441. In: Klute, A (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kennedy, AC & RI Papendick. 1995. Microbial characteristics of soil quality. J. Soil Water Cons. 50: 243-248.
- Korol, S. 2009. Argentina: Misiones, la deforestación, el cambio climático y el tornado de San Pedro. Argenpress.info <http://www.argenpress.info/2009/09/argentina-misiones-la-deforestacion-el.html>. Fecha último acceso: 22/02/2013.
- Kulmatiski, A & KH Beard. 2004. Reducing sampler error in soil research. Soil Biol. Biochem. 36: 383-385.
- Laclau, P. 1994. La conservación de los recursos naturales y el hombre en la selva Paranaense. Fundación Vida Silvestre, Boletín técnico Nº 20. 139 pp.
- Lal, R. 2002. The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Advances in Agronomy, Volume 76: 1-30.

- Lal, R. 2004. Carbon emission from farm operations: Review article. *Environment International* 30: 981-990.
- Larson, WE & FJ Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. p 175-203. In *Evaluation of sustainable management in the developing world*. Vol 2. IBSRAM Proc. 121 (2). Thailand Int. Board for soil Res. and Management, Bangkok.
- Lee, J; JW Hopmans; DE Rolston; SG Baer & J Six. 2009. Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail. *Agric. Ecosyst. Environ.* 134: 251-256.
- Leirós, MC ; C Trasar-Cepeda; F García-Fernández & F Gil-Sotres. 1999. Defining the validity of a biochemical index of soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 30: 140-146.
- Leirós, MC; C Trasar-Cepeda; S Seoane & F Gil-Sotres. 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate humid zone (Galicia, NW Spain): general parameters. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 733-745.
- Little, TM & FJ Hills. 1981. *Métodos estadísticos para la investigación en agricultura*. 3ª reimpresión. Ed. Trillas, México. 270 pp.
- Lowery, B; MA Arshad; R Lal & WJ Hickey. 1996. Soil water parameters and soil quality. p 143-156. In Doran, JW & AJ Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Lupi, AM. 2014. Pautas para el monitoreo de disturbios del suelo ocasionados por el manejo Forestal. Instituto de suelos, CIRN-INTA. Proyectos INTA PNFOR1104073-PNSUELOS1134023pdf. <http://inta.gob.ar/documentos/pautas-para-el-monitoreo-de-disturbios-del-suelo-ocasionados-por-el-manejo-forestal/> Fecha último acceso: 6 de marzo de 2014.
- Lupi, AM; M Conti; R Fernández; D Cosentino & G López. 2007. Efecto de las prácticas de repoblación forestal sobre el carbono orgánico del suelo y la estabilidad de los agregados en el noreste de Argentina. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 2007 16(3), 230-240.
- Macfadyen, A. 1970. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air for use in ecological studies of soil respiration. *SoilBiology & Biochemistry* 2: 9-18.
- Manly, BFJ. 1997. *Multivariate statistical methods: A primer*. Second Ed. Chapman & Hall, London. 216 pp.
- Marinari, S; R Mancinelli; E Campiglia & S Grego. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol. Indicators*, 6: 701-711.
- Mariscal Sancho, I de L. 2008. Recuperación de la calidad de Ultisoles mediterráneos degradados, mediante la aplicación de enmiendas y formas alternativas de uso. Tesis Doctoral. 296p. Universidad Politécnica de Madrid. España.

http://oa.upm.es/1597/1/IGNACIO_DE_LOYOLA_MARISCAL_SANCHO.pdf
 Fecha último acceso: 18/12/2013.

- Martínez, E; J Fuentes & E Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1): 68-96.
<http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>. Fecha último acceso: 13/09/13.
- Masto, RE; PK Chhonkar; D Singh & AK Patra. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environ. Monit. Assess.* 136: 419-435.
- McBratney, AB & B Minasny. 2010. Comment on “Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail” [*Agric. Ecosyst. Environ.* 134 (2009) 251–256]. *Agric. Ecosyst. Environ.* 136: 185-186.
- McCabe, GP. 1984. Principal Variables. *Technometrics* 26 (2): 137-144.
- McColl, JG & N Gressel. 1995. Soil Organic Matter: Characterization and Modern Methods of Analysis. In: *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Book published by: Science Society of America. Soil Issue 2: 13-32.
- Mijangos, I; R Perez; I Albizu & C Garbisu. 2006. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology* 40: 100-106.
- Montenegro González, H, D Malagón Castro & L Guerrero. 1990. *Propiedades Físicas de los Suelos*. Subdirección Agrológica. I.G.A.C. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Bogotá, Colombia. 813 pp.
- Montenegro, C; M Strada; MG Parmuchi; J Bono; M Stamati; E Manghi; M Brouver; E Wabo & F Bertolami. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina 2007. Dirección de bosques. Secretaría de ambiente y desarrollo sustentable. http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UMSEF/File/deforestacion_argentina_v2.pdf. Fecha último acceso: 22/02/2013.
- Moraes Sá, JC & R Lal. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till. Res.* 103: 46-56.
- Morales Vallejo, P. 2013. El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios. Universidad Pontificia Comillas, Madrid. <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/AnalisisFactorial.pdf>
 Fecha último acceso: 15/09/2013.
- Mórtola, NA. 2013. Comportamiento de las formas de fósforo en un Ultisol con diferentes manejos de implantación forestal. Tesis de Maestría. Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano. Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires.
<File:///D:/Antecedentes/QUALITY%20excel/Tesis%20Misiones%20Mortola%202002.pdf>. Fecha último acceso 7/03/2014.
- Mosier, AR. 1998. Soil processes and global change. *Biol. Fertil. Soils* 27: 221-229.
- Murphy, J & JP Riley. 1996. Phosphorus. Pp. 869-919. In: D L Sparks *et al.* (eds). *Methods of Soils Analysis*. Part 3, 5th, SSSA, Madison. Wisc.

- Needelman, BA; MM Wander; GA Bollero; CW Boast; GK Sims & DG Bullock. 1999. Interaction of tillage and soil texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1326-1334.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: JM Bigham (ed.). *Methods of soil analysis, Part. 3. Chemical Methods*. Pp. 961-1010. Am. Soc. Agron. & Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, WI.
- Nieto, OM; J Castro & E Fernández Ondoño. 2012. Sustainable agricultural practices for Mediterranean olive groves. The effect of soil management on soil properties. *Spanish Journal of Soil Science* 2: 70-77.
- Noellemeyer, E; AR Quiroga & D Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments* 65: 142-155.
- Nortcliff, S. 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88: 161-168.
- NRCS-USDA. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. Soil quality information sheet. United States Department of Agriculture, NRCS.
http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053149.pdf
Fecha último acceso: 4/03/2014.
- Ozawa, K; M Osaki; H Matsui; M Honma & T Tadano. 1995. Purification and properties of acid phosphatase secreted from lupin roots under phosphorus-deficiency conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 41: 461-469.
- Palm, R. 1998. L'analyse en composantes principales: principe et application. Notes de statistique et d'informatique. Gembloux, Belgique. Fecha último acceso: 20/12/2013. http://www.gembloux.ulg.ac.be/si/Note98_1/analyse.pdf.
- Parkin, TB; JW Doran & EF Vizcaíno. 1996. Field and laboratory tests of soil respiration. p. 231-245. In: Doran JW & AJ Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Parr, JF; SB Hornick & RI Papendick. 1994. Soil Quality: The Foundation of a Sustainable Agriculture. <http://naldc.nal.usda.gov/download/25531/PDF>. Fecha último acceso: 15/04/2014.
- Parr, JF; RI Papendick; SB Hornick & RE Meyer. 1992. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.* 7(1-2):5-11.
- Peel, MC; BL Finlayson & TA Mc Mahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1633-1644.
- Pennock, D; T Yates & J Braidek. 2008. Soil Sampling Designs. In: Carter, MR & EG Gregorich, (Eds.). 2008. *Soil Sampling and methods of analysis*. 2nd Ed. Taylor & Francis Group LLC. Pp 25-39.
- Peña Zubiarte, CA; D Maldonado Pinedo; A D'Hiriart; & AA Marchi. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000. Tomo II. SAGPyA. Proyecto PNUD/ARG 85/019. INTA. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Imprenta La Paz. Buenos Aires, Argentina.

- Peña, D. 2002. Análisis de datos multivariantes. McGraw-Hill, Interamericana de España S.L. Madrid. 539 pp.
- Pérez Brandán, C; J Huidobro; C Conforto; JL Arzeno; G March; J Meriles & S Vargas Gil. 2010. Impacto de los sistemas de labranza sobre indicadores biológicos de calidad de suelo. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.
file:///D:/Antecedentes/QUALITY%20excel/Perez%20Brandman%202010.pdf
Fecha último acceso: 7/03/2014.
- Pícolo, GA; AE Andriulo & B Mary. 2008. Changes in soil organic matter under different land management in Misiones provincia (Argentina). Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.) 65 (3): 290-297.
- Pícolo, GA; JA Galantini & RA Rosell. 2004. Organic carbon fractions in a yerba mate plantation on a subtropical Kandihumult of Argentina. Geoderma 123: 333-341.
- Pícolo, GA; JA Galantini; RA Rosell & AM Miglierina. 1998. Transformaciones de la materia orgánica en un suelo laterítico (Misiones, Argentina): II. Cambios en la materia orgánica particulada y humificada. Agricultura Técnica (Chile) 58(2): 142-150.
- Pierce, FJ & WE Larson. 1993. Developing criteria to evaluate sustainable land management's. Pp 7-14. In: JM Kimble (ed.). Proceedings of the Eighth International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use. USDA Soil Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Powers, RF; AE Tiarks & JR Boyle. 1998. Assessing soil quality: practicable standards for sustainable forest productivity in the United States. In: MB Adams; K Ramakrishna & EA Davidson (Eds.), The Contribution of Soil Science to the Development of and Implementation of Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management. SSSA Special Publication nº 53.
- Qi, Y; JL Darilek; B Huang; Y Zhao; W Sun & Z Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma 149: 325-334.
- Quevedo, RL. 1991. Una metodología para un estudio de las fincas de producción lechera en el estado Yaracuy. Universidad Central de Venezuela, UCV. Facultad de Agronomía. Maracay-Venezuela. 340 pp.
- Quiroga A; D Funaro; E Noellemeyer & N Peinemann. 2006. Soil Quality indicators and barley fertilization response. Soil Tillage Res. 90: 63-68.
- Quiroga, A & D Funaro. 2004. Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en Molisoles, de las Regiones Semiárida y Subhúmeda Pampeana. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos. Pp 476. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Paraná.
- Quiroga, A; O Ormeño; & N Peineman. 2001. Materia orgánica: un indicador de calidad de suelos relacionado con la productividad de los cultivos. Boletín Divulgación Técnica 70. EEA INTA Anguil. La Pampa, Argentina. 28 pp.

- R- Project. Versión 2.15.0. 2012. Disponible en www.R-project.org or <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/2.15.0/>. Fecha último acceso: 06/12/2013.
- Rasmussen, PE & HP Collins. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue on soil organic matter in temperate semi-arid regions. *Advances in Agronomy*: 45, 93-134.
- Reeves, DW. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Res.* 43: 131-167
- Reicosky, DC. 2007. Carbon sequestration and environmental benefits from no-till systems. In: T Goddard; M Zebisch; Y Gan; W Ellis; A Watson & S Sombatpanit (eds.). No-till farming systems. Special publication nº 3 by The World Association of Soil and Water Conservation (WASWC).
- Richard, G, ICousin; JF Sillon; ABruand & JGuérif. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 49-58.
- Rochette, P; L Desjardins & E Pattey. 1991. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Can. J. Soil Sci.* 71: 189-196.
- Rodríguez, AF & M Silva. 2012. Ecorregión Selva Paranaense. En: Morello, J; S Mateucci & A Rodríguez. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Capítulo 6. 1ª Ed. Orientación Gráfica Editora. 752 pp.
- Rojas, JM. 2012. Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el área piloto de la Ecorregión chaqueña. Maestría en Ciencias Agrarias, Orientación: Producción Sustentable. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán. 152 pp.
- Romaniuk, R; L Giuffré; A Costantini & P Nannipieri. 2011. Assessment of soil microbial diversity measurements as indicators of soil functioning in organic and conventional horticulture systems. *Ecological Indicators*, 11: 1345-1353
- Romaniuk, RI. 2010. Índices de calidad de suelos: evaluación en sistemas extensivos e intensivos de producción agrícola. Tesis Doctoral de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. 133 pp.
- Saggar, S; GW Yeates & TG Shepherd. 2001. Cultivation effects on soil biological properties, microfauna and organic matter dynamics in Eutric Gleysol and Gleyic Luvisol in New Zeland. *Soil Till. Res.* 58: 55-68.
- SAGyP e INTA. 1990. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Proyecto PNUD ARG. 85/019. Atlas de Suelos de la República Argentina. Tomo II: 677 pp.
- Sánchez PA, CA Palm & SW Buol. 2003. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. In: Sposito, G & A Zabel (eds). The assessment of soil quality. *International Journal of Soil Science* 114: 157-186.
- Sánchez-Marañón, M; M Oriano; G Delgado & R Delgado. 2002. Soil quality in mediterranean mountain environments: effects of land use change. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 948-958.

- Sanesi, G. 1965. I suoli di Misiones (Argentina). Academia Italiana di Scienze Forestali. Firenze. 349 pp.
- Santana Rodríguez, LM; LA Escobar Jaramillo & PA Capote. 2010. Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande* 45: 77-95. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>. Fecha último acceso: 02/09/2013.
- Sarrantonio, M; JW Doran; MA Liebig & JJ Halvorson. 1996. On farm assessment of soil quality and health. p. 83-105. In: JW Doran & AJ Jones (eds.) *Methods for assessing soil quality*. SSSA. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- Satur, CA; HC Dalurzo; S Vazquez & HG Andersson. 1998. Propiedades edáficas y diferentes niveles de rendimientos en yerbales de L.N. Alem y San Javier (Misiones). *Actas I Congresso Sulamericano sobre Cultura da Erba Mate*. Colombo (Brasil).
- Schipper, LA & GP Sparling. 2000. Performance of soil condition indicators across taxonomic groups and land uses. *Soil Sci Soc Am J.* 64: 300-311.
- Schoenholtz, SH; H Van Miegroet & JA Burger. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356
- Sharma, KL; J Kusuma Gracia; M Uttam Kumar, NG Pavin; K Srinivas; GR Korwar; V Hima Bindu; V Ramesh; R Kaushalya & SK Yadav. 2008. Evaluation of long-term soil management practices using key indicators and soil quality indexes in a semi-arid tropical Alfisol. *Aust. J. Soil Res.* 46: 368-377.
- Shukla, MK; R Lal & M Ebinger. 2004. Soil quality indicators for reclaimed mine soils in southeastern Ohio. *Soil Science* 169(2) 133-142.
- Shukla, MK; R Lal & M Ebingerb. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research* 87: 194-204.
- Silva, JE, J Lemainski & DVS Resck. 1994. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 18: 541-547.
- Singer, MJ & S Ewing. 2000. Soil Quality. En *Handbook of Soil Science*. Chapter 11. Sumner, ME (Ed.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Sinha, S; RE Masto; LC Ram; VA Selvi; NK Srivastava; RC Tripathi & Joshy George. 2009. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1824-1832.
- Sisti, CPJ; HP dos Santos; R Kohhann; BJR Alves; S Urquiaga & RM Boddey. 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; ET Elliott; K Paustian & JW Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1367-1377.
- Six, J; ET Elliott & K Paustian. 1999. Aggregate turnover and SOM dynamics in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc Am. J.* 63: 1350-1358.

- Six, J; ET Elliott & K Paustian 2000. Soil Structure and Soil Organic Matter: II. A Normalized Stability Index and the Effect of Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.
- Six, J; P Callewaert; S Lenders; S De Gryze; SJ Morris; EG Gregorich; EA Paul & K Paustian. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (6): 1981-1987.
- Solomon, D; F Fritzsche; J Lehmann; M Tekalign & W Zech. 2002. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian Highlands: evidence from Natural ¹³ C abundance and particle-size fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 969-978.
- Spycher, G; P Sollins & S Rose. 1983. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: Vertical distribution and seasonal patterns. *Soil Sci.* 135: 79-87.
- Swayne, DF; D Cook; ABuja; H Hofmann & DT Lang. 2006. Interactive and dynamic graphics for data analysis: With examples using R and GGobi. Iowa State Univ., Ames, IA. <http://www.ggobi.org/book/>. Fecha ultimo acceso: 23/12/2013.
- Tabatabai, MA. 1982. Soil enzymes. In: AL Page; RH Miller & DR Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America . Pp. 903-927.
- Tang, J & DD Baldocchi. 2005. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry* 73: 183-207.
- Tedeschi, LO. 2004. Assessment of the Adequacy of Mathematical Models. Workshop on Mathematical Model Analysis and Evaluation Sassari, Italy. <http://nutritionmodels.tamu.edu/papers/02061.pdf>. Fecha último acceso: 25/10/13.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Toledo, DM; JA Galantini; E. Ferreccio; S. Arzuaga; L. Giménez & S. Vazquez. 2013. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 31 (2) 201-212.
- Torres, D; A Florentino & M López. 2006. Indicadores e índices de calidad del suelo en un Ultisol bajo diferentes prácticas de manejo conservacionista en Guárico, Venezuela. *Bioagro* 18(2): 83-91.
- Torres Viana, E; MA Batista, CA Tormena, AC Saraiva da Costa & TT Inoue. 2011. Atributos físicos e carbono orgánico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 35: 2105-2114.
- Tosin, JE. 1977. Influencia do *Pinus elliottii*, da *Araucaria angustifolia* e da mata native sobre microflora do solo. *Floresta.* 8; 73-74.
- Trasar-Cepeda, C; C Leirós, F Gil-Sotres & S Seoane. 1998. Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties. *Biology and Fertility of Soils*, 26: 100-106.

- Trasar-Cepeda, C; F Camiña; MC Leirós & F Gil-Sotres. 1999. An improved method for measurement of catalase activity in soils. *Soil Biol. Biochem.* 31: 483-485.
- Trasar-Cepeda, C; MC Leirós; S Seoane & F Gil-Sotres. 2008. Biochemical properties of soils under crop rotation. *Applied ecology* 39: 133-143.
- Tusell, F. 2008. *Análisis Multivariante. Notas para alumnos de Estadística: Análisis Multivariante.* Bilbao, España. 165 pp.
- Ullé, J; A Andriulo; V Faggioli; C Scianca; A Castro; F Rimatori *et al.* 2011. Análisis e interpretación de indicadores de calidad de suelos en sistemas orgánicos agrícolas ganaderos. INTA- Memoria Técnica 2011-2012. http://inta.gob.ar/documentos/analisis-e-interpretacion-de-indicadores-de-calidad-de-suelos-en-sistemas-organicos-agricolas-ganaderos-1/at_multi_download/file/MT2012_Ulle_Analisis_interpretacion_indicadores.pdf. Fecha último acceso 30/03/2014.
- USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Traducción al Español del: "Soil Quality Test Kit Guide" Realizada por los investigadores: Alberto Luters, Juan Carlos Salazar & Lea Plaza del "Área de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras". Instituto de Suelos CRN-CNIA-INTA.
- USDA. 2001. Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. SoilQualityInstitute.http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050963.pdf Fecha último acceso: 30/03/2014.
- USDA. 2008. Soil Quality Physical Indicators: Selecting Dynamic Soil Properties to Assess Soil Function. Soil Quality Technical Note No. 10. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050948.pdf Fecha último acceso: 30/03/2014.
- Ussiri, DAN, R Lal & PA Jacinthe. 2006. Soil properties and carbon sequestration of afforested pastures in reclaimed mine soils of Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1797-1806.
- Valles de la Mora, B; G Cadisch & E Castillo Gallegos. 2008. Mineralización de nitrógeno en suelos de pasturas con *Arachis pintoi*. *Téc. Pecu. Méx.* 46(1): 91-105.
- Vazquez, S; L Morales & HC Dalurzo. 2004. "Disponibilidad del fósforo en suelos ácidos de Misiones, Argentina". *Rev. Agric. Técnica. Chile.* Vol. 64 (1): 50-57.
- Videla C; A Pazos; PC Trivelin; HE Echeverría & GA Studdert. 2005. Mineralización bruta de nitrógeno bajo labranza convencional, siembra directa y pastura. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 23(2): 133-144.
- Vigglizzo, EF & E Jobbágy. 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Buenos Aires. Ediciones INTA. 102 p.
- Villamil, MB; FE Miguez & GA Bollero 2008. Multivariate Analysis and Visualization of Soil Quality Data for No-Till Systems. *J. Environ. Qual.* 37: 2063-2069.
- Von Wallis, A; R Martiarena & N Pahr. 2008. Condición química de un suelo rojo de Misiones en situación de quema y no quema de residuos forestales. XIII

- Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNAM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. http://inta.gob.ar/documentos/condicion-quimica-de-un-suelo-rojo-de-misiones-en-situacion-de-quema-y-no-quema-de-residuos-forestales/at_multi_download/file/Condicion_quimica_suelos_quema.pdf. Fecha último acceso: 30/03/2014.
- Voroney, RP; JA Van Veen & EA Paul. 1981. Organic C dynamics in grassland soils. 2. Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion. *Can. J. Soil Sci.* 61: 211-224.
- Wander, MM & GA Bollero. 1999. Soil Quality Assessment of Tillage Impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- Wander, MM; SJ Traina; RB Stinner & SE Peters. 1994. The effects of organic and conventional management on biologically-active soil organic matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1130-1139.
- Wang, X & Z Gong. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma* 81:339-355.
- Warkentin, BP. 1995. The changing concept of soil quality. *J. Soil Water Conserv.* 50: 226-228.
- Warrick, AN & DR Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: D Hillel (ed). *Applications of Soil Physics*. Pp 319-344. Academic Press, New York.
- Wendling, B; I Jucksch; ES Mendonça & JCL Neves. 2005. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesq. Agropec. Bras.* 40: 487-494.
- Wienhold, BJ; SS Andrews & DL Karlen. 2006. Soil quality: indices and appraisal. *Proc. International Conference on Soil, Water, and Environmental Quality-issues and strategies*. Pp 67-72. New Delhi, India. International Symposium on Ecological Indicators and Indices.
- Xu M; Y Zhao; G Liu; & GV Wilson. 2006. Identification of soil quality factors and indicators for the loess plateau of China. *Soil Science*, 171: 400-413.
- Yakovchenko, VI; LJ Sikora & DD Kaufman. 1996. A biologically based indicator of soil quality. *Biology and Fertility of Soils* 21, 245-251.
- Yoshioka, IC; M Sánchez de Prager & MM Bolaños. 2006. Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en suelo cultivado con plátano en tres sistemas de manejo. Artículo derivado de la Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos. UNAL. Colombia. http://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/211/actividad.htm Fecha último acceso: 13/12/2013.
- Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arcenegui; J Mataix-Beneyto & I Gómez. 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 2079-2087.

ANEXO



Figura 1: Mapa político de la República Argentina, en color verde, la Provincia de Misiones.

Fuente: Commons.wikimedia.org/wiki/File:Provincia_de_Misiones_(Argentina).svg



Figura 2: Mapa climático de la República Argentina.

Fuente: <http://mapoteca.educ.ar/mapa/republica-argentina/?tema=climatico>



Figura 3: Mapa de Eco-regiones de la República Argentina: en rojo Selva Paranaense.
 Fuente: <http://mapoteca.educ.ar/mapa/república-argentina/?tema=climatico>

TABLA I. Perfil característico correspondiente a Oxisoles

Clasificación taxonómica: Eutrudox Ródico, arcillosa fina, hipertérmica.

Capacidad de uso: II.

Material originario: Basalto

Vegetación: Yermal con manejo convencional de la zona.

Paisaje: Planicies ligeramente onduladas de la Meseta Central Preservada.

Posición: Loma.

Pendiente: 3%.

Drenaje: Bien drenado.

Principales limitaciones de uso: erosión hídrica ligera.

Ubicación: Departamento de Alem; Provincia de Misiones. Ruta provincial N°4 a 3 km al sur de la rotonda de L.N. Alem.

Altitud sobre el nivel del mar: 350 m.

A1 0-26 cm: Límite claro suave. Arcilloso, de color rojo oscuro, (10 R 3/2) en húmedo, estructura en bloques subangulares finos y granular fina. Consistencia friable. Raíces abundantes.

A2 26-46 cm: Límite gradual suave. Arcilloso, de color rojo oscuro, (10 R 3/3) en húmedo, estructura en bloques subangulares medias moderadas que rompen a estructuras granulares finas. Consistencia friable. Raíces abundantes.

B1 46-67 cm: Límite Gradual suave. Arcilloso, de color rojo oscuro, (10 R 3/3) en húmedo, estructura en bloques subangulares medios. Concreciones de hierro manganeso escasas. Consistencia friable, plástica y adhesiva. Raíces comunes.

B2 67-104 cm: Límite Gradual suave. Arcilloso, de color rojo oscuro, (10 R 3/4) en húmedo, estructura en bloques angulares más subangulares medios. Cutanes escasos. Concreciones de hierro manganeso escasas. Consistencia firme, plástica y adhesiva. Raíces comunes.

B3 104-130cm: Límite Gradual suave. Arcilloso, de color rojo oscuro, (10 R 3/6) en húmedo, estructura en bloques angulares medios. Cutanes arcillosos escasos. Consistencia firme, plástica y adhesiva. Raíces escasas y gruesas.

TABLA II. Caracterización de los suelos utilizados en la validación de los índices desarrollados. Datos analíticos de los suelos bajo sistemas naturales y cultivados.

Vegetación natural: Selva subtropical prístina

Ubicación: Departamento Oberá; Coordenadas: 27°29'56" Lat. S. y 55°08'39" Long. O.

Altitud: 324 m s.n.m.

Profundidades (cm)	0-15	15-35	35-60	60-105	+105
Arcilla (%)	70,9	75,1	81,41	60,38	81,41
Limo (%)	16,82	14,7	14,72	18,9	8,41
Arena (%)	12,28	10,18	3,87	20,6	10,18
pH (†)	5,07	4,49	-	-	-
Materia orgánica (%)	12,47	2,49	2,03	1,60	1,44
Fósforo disponible (mg kg ⁻¹)	7,58	0,49	0,94	1,14	0,85
Calcio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	10,11	2,84	1,83	1,43	1,63
Magnesio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,63	0,62	0,41	0,62	0,42
Potasio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,40	0,10	0,12	0,13	0,10
Sodio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06
Acidez intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,37	0,99	1,72	1,95	2,71
Aluminio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,31	0,83	2,74	2,30	3,19
Suma de bases interc. (cmol kg ⁻¹) "S"	11,23	3,63	4,93	4,96	5,32
Capacidad de cambio (cmol kg ⁻¹) "T"	11,60	4,62	6,65	6,91	8,03
Saturación de bases (%)	96,80	78,50	74,14	71,76	66,25

Vegetación: Cultivo de Té

Ubicación: Departamento Oberá; Coordenadas: 27°25'42" Lat. S. y 55°07'04" Long. O.

Altitud: 356 m s.n.m.

Profundidades (cm)	0-20	20-33	33-58	58-75	75-100
Arcilla (%)	70,55	78,69	80,16	84,08	88,16
Limo (%)	21,4	14,49	4,14	4,13	4,13
Arena (%)	8,0	6,82	15,7	11,7	7,7
pH (†)	5,29	5,08	-	-	-
Materia orgánica (%)	2,44	2,05	1,09	1,6	1,35
Fósforo disponible (mg kg ⁻¹)	4,05	0,24	0,35	1,08	1,33
Calcio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	2,14	1,99	3,45	1,62	1,62
Magnesio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,52	0,41	1,04	0,21	0,62
Potasio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,13	0,05	0,08	0,02	0,02
Sodio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06
Acidez intercambiable (cmol kg ⁻¹)	1,39	1,38	0,62	0,62	1,44
Aluminio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,51	0,77	0	0	0,89
Suma de bases interc. (cmol kg ⁻¹) "S"	2,88	2,51	4,63	1,91	2,32
Capacidad de cambio (cmol kg ⁻¹) "T"	4,27	3,89	5,25	2,53	3,76
Saturación de bases (%)	67,3	64,4	88,17	75,50	61,63

Vegetación: Cultivo de Maíz**Ubicación:** Departamento Oberá; Coordenadas: 27°27'25" Lat. S. y 55°05'10" Long. O.**Altitud:** 366 m s.n.m.

Profundidades (cm)	0-20	20-30	40-68	68-82	+82
Arcilla (%)	71,6	77,86	72,20	65,79	76,50
Limo (%)	25,4	19,08	16,64	18,67	16,67
Arena (%)	2,94	3,05	11,17	15,54	6,84
pH (†)	5,35	4,47	-	-	-
Materia orgánica (%)	5,41	4,36	3,24	3,5	1,50
Fósforo disponible (mg kg ⁻¹)	3,49	0,73	1,88	1,83	0,60
Calcio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	3,38	2,80	3,87	4,07	1,23
Magnesio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,84	1,02	1,87	0,83	0,42
Potasio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,45	0,48	0,15	0,12	0,01
Sodio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,16	0,15	0,14	0,15	0,06
Acidez intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,69	0,94	1,08	2,99	4,23
Aluminio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0	0,29	0,46	1,66	2,83
Suma de bases interc. (cmol kg ⁻¹) "S"	4,83	4,46	6,03	5,17	1,71
Capacidad de cambio (cmol kg ⁻¹) "T"	5,52	5,42	7,11	8,15	5,95
Saturación de bases (%)	87,4	82,61	84,79	63,37	28,84

Vegetación: Pinus sp.**Ubicación:** Departamento Oberá; Coordenadas: 27°31'06" Lat. S. y 55°09'40" Long. O.**Altitud:** 363 m s.n.m.

Profundidades (cm)	0-20	20-40	40-70	70-100
Arcilla (%)	76,5	74,5	70,4	74,5
Limo (%)	20,2	18,3	12,2	20,3
Arena (%)	3,17	7,2	17,4	5,2
pH (†)	3,88	3,95	-	-
Materia orgánica (%)	4,74	2,94	2,68	1,85
Fósforo disponible (mg kg ⁻¹)	2,46	0,64	0,35	0,35
Calcio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	1,61	2,43	1,63	1,63
Magnesio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,51	0,83	0,21	0,62
Potasio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,03	0,10	0,08	0,03
Sodio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0,12	0,08	0,06	0,06
Acidez intercambiable (cmol kg ⁻¹)	4,47	2,85	3,41	3,00
Aluminio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	2,56	1,59	2,33	1,62
Suma de bases interc. (cmol kg ⁻¹) "S"	2,27	3,44	1,98	2,34
Capacidad de cambio (cmol kg ⁻¹) "T"	6,75	6,29	5,39	5,34
Saturación de bases (%)	33,6	54,70	36,78	43,82

Nota: (†) las determinaciones de pH se realizaron en Cloruro de Potasio 0,1N en relación 1:2,5.



Foto 1: Calicata bajo sistemas naturales (selva subtropical; Departamento Oberá, Coord.: 27°29'56" Lat. S. y 55°08'39" Long.)



Foto 2: Calicata bajo sistemas cultivados (Té; Departamento Oberá, Coord.: 27°25'42" Lat. S. y 55°07'04" Long. O.).

TABLA III: Valores medios obtenidos para los indicadores físicos de calidad, análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$), en los sistemas de la Etapa II: selva (SV), té (Té), maíz (Mz) y pino (Pi), para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m (1); 0,10-0,20 m (2) y 0,20-0,30 m (3).

PROPIEDADES FÍSICAS						
Atributo	Prof	SV	Té	Mz	Pi	p-valor
Da g cm^{-3}	1	0,75c	1,46a	1,09b	1,01b	<0,0001
	2	0,87c	1,35a	1,08b	1,06b	<0,0001
	3	0,85c	1,25a	1,06b	1,07b	<0,0001
Dr g cm^{-3}	1	2,62c	2,83b	2,98a	2,73bc	<0,0001
	2	2,74b	2,79b	2,91a	2,78b	0,0613
	3	2,71ab	2,79ab	2,84a	2,66b	0,1153
Eae %	1	45,71a	10,67c	34,75b	32,81b	<0,0001
	2	41,36a	15,59c	32,46b	31,27b	<0,0001
	3	42,53	20,64c	31,44b	28,34b	<0,0001
EA %	1	98,13a	90,55b	97,76a	91,83ab	0,0166
	2	97,41a	94,42a	96,70a	88,77b	0,0005
	3	93,66a	91,16ab	92,72a	87,36b	0,0248
HE %	1	34,52a	26,04c	16,45c	29,90b	<0,0001
	2	31,19a	26,71c	28,02b	29,02b	<0,0001
	3	30,47a	27,69b	29,59a	29,37a	0,0013
RP Kpa	1	0,55bc	3,47a	0,33c	0,77b	<0,0001
	2	0,91b	2,22a	0,72b	0,83b	<0,0001
	3	0,91bc	1,50a	0,67c	0,96b	<0,0001
Ib cm h^{-1}	1	71,16a	14,19d	27,32c	46,44b	<0,0001

Da: densidad aparente, **Dr:** densidad real, **Eae:** espacio aéreo, **EA:** estabilidad de agregados, **HE:** humedad equivalente, **RP:** resistencia mecánica a la penetración, **Ib:** infiltración básica. Coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p-valor).

TABLA IV: Valores medios obtenidos para los indicadores químicos de calidad, análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$), en los sistemas de la Etapa II: selva (SV), té (Té), maíz (Mz) y pino (Pi), para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m (1); 0,10-0,20 m (2) y 0,20-0,30 m (3).

PROPIEDADES QUÍMICAS						
Atributo	Prof	SV	Té	Mz	Pi	p- valor
pH KCl	1	5,35ab	5,56a	5,07b	4,50c	<0,0001
	2	4,93a	5,39a	5,09a	4,40b	<0,0001
	3	4,82b	5,34a	5,07ab	4,36c	<0,0001
CO %	1	3,81a	2,36b	2,27b	2,39b	0,0002
	2	2,26a	1,60b	1,80b	1,65b	0,0027
	3	1,72a	1,33b	1,25b	1,44ab	0,0153
N %	1	0,27a	0,18b	0,18b	0,14c	<0,0001
	2	0,15a	0,14a	0,14a	0,11b	0,0076
	3	0,11a	0,11a	0,11a	0,09a	0,1624
P mg kg⁻¹	1	4,13a	2,80ab	2,40b	2,84ab	0,1114
	2	1,77ab	0,82b	1,22b	2,47a	0,0096
	3	1,25ab	0,68ab	0,67b	1,35a	0,1132
K cmolc kg⁻¹	1	0,37ab	0,35b	0,48a	0,30b	0,0084
	2	0,33a	0,25a	0,35a	0,26a	0,1339
	3	0,32a	0,21a	0,27a	0,22a	0,2165
Ca cmolc kg⁻¹	1	7,94a	4,74b	7,99a	5,61b	0,0022
	2	5,26b	4,32b	7,45a	4,64b	0,0030
	3	4,47b	3,98b	7,25a	4,23b	0,0003
Mg cmolc kg⁻¹	1	3,33a	2,67a	1,66b	1,25b	0,0004
	2	2,57a	2,00a	1,10b	0,86b	<0,0001
	3	2,34a	2,17a	1,06b	0,69b	<0,0001
H cmolc kg⁻¹	1	0,42b	0,80b	0,28b	1,85a	0,0062
	2	0,95ab	0,98ab	0,27b	2,21a	0,0101
	3	1,23ab	1,20ab	0,33b	2,04a	0,0261
Al cmolc kg⁻¹	1	0,10b	0,52ab	0,00b	1,18a	0,0119
	2	0,52ab	0,68ab	0,00b	1,53a	0,0240
	3	0,79ab	0,86ab	0,02b	1,37a	0,0442

pH: pH en KCl, **CO:** carbono orgánico, **N:** nitrógeno total, **P:** fósforo extractable, **K:** potasio; **Ca:** calcio, **Mg:** magnesio; **H:** acidez intercambiable; **Al:** aluminio intercambiable.
Coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p-valor).

TABLA V: Valores medios obtenidos para los indicadores biológicos de calidad, análisis de varianza y Prueba LSD ($p < 0,05$), en los sistemas de la Etapa II: selva (SV), té (Té), maíz (Mz) y pino (Pi), para las profundidades comprendidas entre 0-0,10 m (1); 0,10-0,20 m (2) y 0,20-0,30 m (3).

PROPIEDADES BIOLÓGICAS						
Atributo	Prof	SV	Té	Mz	Pi	p-valor
MOPa g.Kg ⁻¹	1	3,61a	5,04a	2,15a	2,13a	0,3707
	2	1,50ab	2,42a	1,12b	1,86ab	0,1734
	3	1,19a	1,10a	0,76a	1,11a	0,2971
MOPb g.Kg ⁻¹	1	6,75a	6,65a	5,42a	5,35a	0,4484
	2	2,43b	2,86ab	3,92ab	4,10a	0,0838
	3	1,73ab	1,52b	2,27ab	2,43a	0,1216
MOP g.Kg ⁻¹	1	10,36a	11,69a	7,48a	7,57a	0,3094
	2	3,93a	5,28a	5,04a	6,23a	0,3905
	3	2,92a	2,62a	3,03a	3,67a	0,3515
Npm %	1	0,02a	0,01b	0,0035b	0,0047b	<0,0001
	2	0,01a	0,0031b	0,0030b	0,0030b	<0,0001
	3	0,0042a	0,0024b	0,0019b	0,0024b	<0,0001
Enz µg of p-nitrof g ⁻¹ soil h ⁻¹	1	427,11a	197,31c	249,17bc	256,67b	<0,0001
	2	163,78ab	125,87b	182,09a	161,39ab	0,0705
	3	126,49a	84,36b	130,20a	126,34a	0,0119
Res kgCO ₂ .ha ⁻¹ .d ⁻¹	1	42,66b	26,80b	65,94a	67,01a	<0,0001

MOP: Materia orgánica particulada total, **MOPa:** MOP de 2 a 0,01mm; **MOPb:** MOP de 0,01 a 0,053 mm; **Npm:** nitrógeno potencialmente mineralizable; **Enz:** actividad de fosfatasas acidas; **Res:** respiración de suelo, Coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p-valor).

TABLA VI: Límites de calibración: Valores mínimos y máximos correspondientes a los distintos atributos de suelo que conformaron los índices de calidad desarrollados por análisis de componentes principales, a partir de los sistemas de la Etapa I (selva subtropical, yerba convencional, tabaco y citrus).

Atributo	Mín.	Máx.	Atributo	Mín.	Máx.
Da (g cm^{-3})	0,6	1,4	pH	3,19	6
EA (%)	66	99	N (%)	0,09	0,65
Eae (%)	14	54	CO (%)	0,9	5,3
HE (%)	22	40	P (mg kg^{-1})	0,1	35
Ib (mm h^{-1})	0,5	78	K (cmol kg^{-1})	0,07	1,7
RP (Mpa)	0,15	2,1	Ca (cmol kg^{-1})	0,76	29
MOP (g kg^{-1})	1,26	22	Mg (cmol kg^{-1})	0,09	13
Npm (%)	$7,10^{-4}$	0,03	H (cmol kg^{-1})	0,26	6,5
Enz (μg of p-nitrofenol g^{-1} suelo h^{-1})	96	1039	Al (cmol kg^{-1})	0	4
Res ($\text{KgCO}_2\text{ha}^{-1}\text{h}^{-1}$)	10	73			