



**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**



**CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS EN SUELOS
SUBTROPICALES DE LA PROVINCIA DE FORMOSA ANTE EL PROCESO
DE AGRICULTURIZACIÓN. UN APOORTE AL CONOCIMIENTO DE LA
CALIDAD DEL SUELO Y SUS INDICADORES**

**Tesis presentada para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias y
Forestales**



Doctorando: Ing. Ftal. Juan Esteban Baridón

Director: Ing. Agr., Ms. Sc. Roberto Raúl Casas

Jurados:

-Ing. Agr. Dra. Margarita Alconada

-Ing. Agr. Dr. Alberto Quiroga.

-Ing. Agr. Ms. Sc. Alberto Sfeir

La Plata, Agosto de 2015

ÍNDICE

	pg.
RESUMEN	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	3
I.1- Introducción	4
I.2- Los indicadores de calidad de suelos y su utilización	6
I.2.1- Definición	6
I.2.2- Evolución y alcances	6
I.2.3- Antecedentes en el país	8
I.2.4- Aplicación de indicadores	9
I.3- Indicadores en suelos del NEA	9
I.4- Fundamentos de la elección del tema	11
I.5- Hipótesis y objetivos	12
I.6- Estructura esquemática de la Tesis.	13
CAPÍTULO II. CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS	15
II.1- Introducción	16
II.2- Materiales y métodos	17
II.2.1- El área de trabajo	17
II.2.2- Los suelos de estudio	22
II.2.3- Identificación de Sistemas Productivos Representativos (SPR)	22
II.2.4- Diseño del muestreo	24
II.2.5- Variables edáficas evaluadas	24
II.2.6- Análisis estadísticos	25
II.3- Resultados	25
II.3.1- Los suelos estudiados.	25
II.3.1.a- Zonificación edáfica	25
II.3.1.b- Descripción de perfiles representativos de los Hapludoles y Argiudoles identificados.	30
II.3.2- Los Sistemas Productivos Representativos (SPR) y la selección de las zonas de trabajo.	36
II.3.3- Evaluación de cambios físicos, químicos y biológicos en los suelos.	36
II.3.3.a- Carbono orgánico total (COt)	38
II.3.3.b- Carbono orgánico particulado (COp)	40
II.3.3.c- Nitrógeno Total (Nt)	42
II.3.3.d- Actividad respiratoria (Res)	45
II.3.3.e- Actividad enzimática de la deshidrogenasa (ADh)	47
II.3.3.f- Actividad enzimática de la ureasa (AUr)	49

II.3.3.g- Estabilidad estructural (EE)	51
II.3.3.h- Conductividad hidráulica (CH)	53
II.3.3.i- Potencial hidrógeno subsuperficial	55
II.3.3.j- Conductividad eléctrica subsuperficial	58
II.3.4- Comparación del efecto edáfico de los distintos SPR	62
II.4- Discusión	62
II.4.1- Contenido de Carbono orgánico total (COt)	63
II.4.2- Contenido de Carbono orgánico particulado (COp)	63
II.4.3- Contenido de Nitrógeno total (Nt)	64
II.4.4- Respiración edáfica (Res)	64
II.4.5- Actividad enzimática: deshidrogenasa (ADh) y ureasa (AUr)	65
II.4.6- Estabilidad estructural (EE)	66
II.4.7- Conductividad hidráulica (CH)	66
II.4.8- pH y contenido salino subsuperficial.	67
II.4.9- El efecto edáfico de los distintos SPR.	67
II.5-Conclusiones	68
CAPÍTULO III. IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELOS	69
III.1- Introducción	70
III.2- Materiales y métodos	71
III.3- Resultados	71
III.3.1- Detección de posibles indicadores y peso de los mismos.	71
III.3.2- Selección de indicadores de calidad	75
III.4- Discusión	77
III.5- Conclusiones	78
CAPÍTULO IV. SELECCIÓN DE INDICADORES. PROCEDIMIENTO	80
IV.1- Introducción	81
IV.2- Procedimiento metodológico	82
IV.2.1- Definición y caracterización del área de aplicación	82
IV.2.2- Identificación de puntos críticos y definición del objetivo de manejo	82
IV.2.3- Determinación de variables edáficas sensibles a distintos usos del suelo	83
IV.2.4- Valoración del peso individual de las variables	84
IV.2.5- Selección de indicadores	84
IV.3- Discusión del procedimiento.	84
IV.3.1- Definición y caracterización del área de aplicación	84
IV.3.2- Identificación de puntos críticos y definición del objetivo de manejo	85

IV.3.3- Sensibilidad de las variables edáficas	86
IV.3.4- Valoración del peso individual de las variables.	86
IV.3.5- Selección de indicadores	87
IV.4- Conclusiones	88
<hr/>	
CAPÍTULO V. SÍNTESIS Y DISCUSIÓN GENERAL	89
V.1- Síntesis de resultados obtenidos	90
V.2- Discusión	92
V.3- Conclusiones generales	93
<hr/>	
BIBLIOGRAFÍA	95
<hr/>	

- ÍNDICE DE TABLAS

	pg.
Tabla 1. Descripción analítica del perfil representativo de un Hapludol	31
Tabla 2. Descripción analítica del perfil representativo de un Argiudol	34
Tabla 3. Valores medios de las variables analizadas en función del uso del suelo	37
Tabla 4. Resumen estadístico de COt en función del uso del suelo.	38
Tabla 5. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre COt, ANOVA.	39
Tabla 6. Resumen estadístico de COp en función del uso del suelo.	41
Tabla 7. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre COp, ANOVA.	41
Tabla 8. Resumen estadístico de Nt en función del uso del suelo	43
Tabla 9. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre Nt, ANOVA.	43
Tabla 10. Resumen estadístico de actividad respiratoria (Res) en función del uso del suelo.	45
Tabla 11. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre Res., ANOVA.	45
Tabla 12. Resumen estadístico de ADh en función del uso del suelo.	47
Tabla 13. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre ADh, ANOVA.	47
Tabla 14. Resumen estadístico de AUr en función del uso del suelo.	49
Tabla 15. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre AUh, ANOVA	49
Tabla 16. Resumen estadístico de EE en función del uso del suelo.	51
Tabla 17. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la estabilidad estructural, ANOVA.	51
Tabla 18. Resumen estadístico de CH en función del uso del suelo.	53
Tabla 19. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la CH, ANOVA.	53
Tabla 20. pH de 20-40 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.	55
Tabla 21. pH de 40-60 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.	55
Tabla 22. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (20-40 cm), ANOVA	56
Tabla 23. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (40-60 cm), ANOVA.	56
Tabla 24. CE de 20-40 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.	58
Tabla 25. CE de 40-60 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.	59
Tabla 26. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (20-40 cm), ANOVA.	59
Tabla 27. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (40-60 cm), ANOVA.	59
Tabla 28. Resumen del comportamiento de las variables en los distintos usos del suelo	62
Tabla 29. Varianza explicada por las distintas componentes. Análisis de Componentes Principales.	72
Tabla 30. Coeficientes y pesos de las variables en las dos primeras Componentes (ACP con 12 variables).	74
Tabla 31. Correlaciones entre las variables preseleccionadas.	76

- ÍNDICE DE FIGURAS

	pg.
Figura 1. Estructura esquemática de la tesis	14
Figura 2. Ubicación esquemática del área de trabajo	17
Figura 3. Fotografía del riacho El Porteño a la altura de Misión Tacaaglé	18
Figura 4. . Cauce del “Riacho El Porteño”	21
Figura 5. Zonificación edáfica del área 1, Misión Tacaaglé	26
Figura 6. Zonificación edáfica del área 2, Espinillo	27
Figura 7. Zonificación edáfica del área 3, Buena Vista	28
Figura 8. Perfil representativo de un Hapludol	31
Figura 9. Perfil representativo de un Argiudol	34
Figura 10. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el COt.	39
Figura 11. Carbono orgánico total (COt) en función del uso del suelo. Comparación de medias y medianas.	40
Figura 12. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el COP.	41
Figura 13. Carbono orgánico particulado (COP) en función del uso del suelo. Comparación de medias y medianas.	42
Figura 14. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el Nt.	44
Figura 15. Nitrógeno total (Nt) en función del uso del suelo. Comparación de medias y medianas.	44
Figura 16. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la Res.	46
Figura 17. Actividad respiratoria en el suelo (Res) en función del uso. Comparación de medias y medianas.	46
Figura 18. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la ADh.	48
Figura 19. Actividad de la deshidrogenasa en función del uso. Comparación de medias y medianas	48
Figura 20. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la AUr.	50
Figura 21. Actividad de la ureasa en función del uso. Comparación de medias y medianas.	50
Figura 22. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la EE.	52
Figura 23. Estabilidad estructural en función del uso. Comparación de medias y medianas	52
Figura 24. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la CH.	54
Figura 25. Conductividad Hidráulica en función del uso. Comparación de medias y medianas.	54
Figura 26. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (20-40 cm).	56
Figura 27. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (40-60 cm).	57
Figura 28. pH (20-40 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas	57

Figura 29. pH (40-60 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas	58
Figura 30. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (20-40 cm).	60
Figura 31. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (20-40 cm).	60
Figura 32. CE (20-40 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas	61
Figura 33. CE (40-60 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas	61
Figura 34. Coeficientes de las variables en cada componente (12 variables)	73
Figura 35. Coeficientes de las variables en cada componente (9 variables)	75
Figura 36. Esquema del desarrollo metodológico aplicado.	83

Para Alcides, a quién le hubiese gustado mucho ver este trabajo terminado....

RESUMEN.

El proceso de agriculturización ha sido definido como el avance de cultivos anuales sobre diferentes ambientes, en competencia con los usos tradicionales de la tierra. Dentro de las provincias que comprenden el Chaco Argentino, Formosa es una de las menos afectadas por este proceso, sin embargo el actual Plan de Ordenamiento Territorial de la provincia contempla que el área cultivada actual, 400.000 ha, podría expandirse en más de 2,5 millones de ha. Aquí entonces, el proceso de agriculturización implica tanto la utilización de nuevas tierras, como la reconversión de los sistemas agrícolas, frutihortícolas y ganaderos existentes, en particular sobre los suelos de mejor aptitud, Argiudoles y Hapludoles.

Al momento de analizar la sustentabilidad de un sistema de manejo se hace indispensable evaluar la calidad del suelo, lo cual puede realizarse mediante el empleo de indicadores. Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante, haciendo que un fenómeno de interés se haga perceptible. Los indicadores no son universales, sino particulares a distintos suelos, regiones y objetivos de manejo. Hasta la fecha, para la región subtropical norte de Formosa, al igual que para otras regiones del mundo no se han identificado indicadores de calidad de suelo, como así tampoco se ha desarrollado una metodología sistemática para determinarlos.

Los objetivos del presente estudio fueron: Identificar indicadores de calidad para Argiudoles y Hapludoles subtropicales; definir un procedimiento para la individualización de los mismos y comprobar que dentro del conjunto de indicadores identificados, aquellos asociados a la Materia Orgánica resultan los de mayor peso.

Para cumplimentar estos objetivos fue necesario:

- *Determinar variables edáficas sensibles a distintos usos del suelo*
- *Establecer el peso individual de estas variables sobre la variabilidad total hallada en el suelo frente a los usos confrontados.*
- *Definir las alternativas productivas más compatibles con un sistema sustentable.*

Se trabajó sobre Argiudoles y Hapludoles desarrollados sobre el albardón del riacho "El Porteño" en el NO del departamento Pilagás, Formosa 24° 59'S., 58° 33'O. Los efectos de cuatro usos del suelo: monte nativo, pasturas, agricultura continua y fruticultura, luego de 25 años, fueron analizados en lotes de producción. Se realizó un muestreo estratificado en aproximadamente 21.000 ha, donde se tomaron muestras de

0-10; 20-40 y 40-60 cm. Sobre muestras de 0 a 10 cm de profundidad se evaluó: carbono orgánico total (COt), carbono particulado (COp), nitrógeno total (Nt), respiración edáfica (Res), actividad de la ureasa (AUr), actividad de la deshidrogenasa (ADh), estabilidad estructural (EE), conductividad hidráulica (CH), pH y conductividad eléctrica (CE). En muestras subsuperficiales, de 20 a 40 y de 40 a 60 cm, se evaluó pH y conductividad eléctrica.

Se utilizaron técnicas de estadística descriptiva para analizar el comportamiento de las variables y la existencia de diferencias significativas entre los distintos usos del suelo. Aquellas que resultaron sensibles a los distintos usos fueron evaluadas en forma multivariada. A través de análisis de componentes principales se determinó el peso relativo de las variables sobre la varianza del sistema, descartando aquellas de menor peso. Mediante análisis de correlaciones y criterios agronómicos se seleccionaron indicadores de calidad de suelos.

Todos los parámetros considerados, a excepción del contenido salino de la capa superficial del suelo, presentaron diferencias significativas entre los distintos usos del suelo. De los tres usos comparados con el monte nativo, el uso pasturas resultó el más compatible con un sistema productivo sustentable desde el punto de vista edáfico. Los actuales sistemas de agricultura continua y frutícola deben incorporar modificaciones de manejo ya que conducen a una degradación del suelo. El carbono orgánico total, la fracción particulada del carbono orgánico, la estabilidad de los agregados a la acción de agua y la actividad de la enzima deshidrogenasa constituyen los mejores indicadores de calidad para los Argiudoles y Hapludoles evaluados. Dentro de ellos, los de mayor peso, estabilidad estructural y carbono orgánico particulado, guardan una relación directa con el contenido y tipo de materia orgánica del suelo.

Entre los efectos de los de los sistemas productivos con respecto al monte nativo, la agricultura continua originó disminuciones de 30,75 % de COt, 72,3 % de COp, 62,44% de EE y 59,17 % de ADh. El sistema fruticultura provocó un descenso de 17,3 % en COt, 48,7 % de COp, 46,7% de EE y 47,1 % de ADh. El sistema pasturas, incrementó el contenido de COt en 24,7 % y aumentó la EE 12,7%; así mismo COp y ADh disminuyeron 20,2 % y 32,5 % respectivamente.

La metodología desarrollada es sistemática, está fundada en numerosos antecedentes, y permite la identificación objetiva de indicadores de calidad de suelos. Estas características la harían aplicable en otros suelos, ambientes y sistemas productivos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

I.1- Introducción:

El proceso de agriculturización ha sido definido como el avance de cultivos anuales sobre diferentes ambientes, en competencia con los usos tradicionales de la tierra (Duhour *et al.*, 2009; Manuel-Navarrete *et al.*, 2009); como por ejemplo la entresaca de madera y pastoreo de montes, y las rotaciones de agricultura con pasturas, entre otros. La agriculturización en la Argentina avanza sobre distintas regiones, produciendo la expansión de la frontera agrícola y diferentes niveles de impacto sobre los recursos naturales, entre ellos los suelos (SAGyP, 1995). En el período 1988-2002, la superficie dedicada a cultivos anuales en el país creció con una tasa media anual próxima al 0,3 %. Este crecimiento no fue uniforme ni en el espacio, ni en el tiempo (Paruelo *et al.*, 2005; Paruelo *et al.*, 2006). En algunas ocasiones, para concretar esta expansión agrícola, se incrementó la tecnología de producción mediante biotecnología, siembra directa, plaguicidas, fertilización y eventualmente riego. Tal es el caso de Chaco, Formosa y Santiago del Estero, que junto al este de Salta y norte de Santa Fe, comprenden la mayor parte del Chaco Argentino. Adámoli *et al.* (2004) realizaron un diagnóstico ambiental para la región chaqueña y proyectaron para el período 1995-2010, un incremento de 10% de la superficie cultivada. Al mismo tiempo concluyeron, acerca de la sustentabilidad de este crecimiento agrícola, que el proceso, basado en el cultivo de soja, como antes lo estuvo en el cultivo de algodón, implicaba una serie de riesgos. Según el Censo Nacional Agropecuario del año 2008 (INDEC) el crecimiento en superficie cultivada fue superior a ese valor en Santiago del Estero e inferior en Formosa. La tasa de deforestación anual para esta última provincia en el período 1998-2002, fue de 0,16% de sus bosques nativos (Montenegro *et al.*, 2005), constituyendo una de las menores de la región Chaqueña. No obstante dentro del marco legal de la Ley 26.331 de Bosques Nativos, la provincia de Formosa ha aprobado un Plan de Ordenamiento Territorial, POT-For (MPyA, 2009). Este plan contempla que el área cultivada actual, 400.000 ha, podría expandirse en más de 2,5 millones de ha. Cambios de tal magnitud en el uso del territorio no deberían efectuarse sin haber evaluado suficientemente los efectos que producirán sobre la calidad de los suelos. Por esta razón la obtención de información edáfica que constituya un aporte a la definición de la calidad del suelo, sus indicadores y los cambios esperables, a partir de suelos que aún conservan bosques nativos, es de particular interés.

La provincia de Formosa se encuentra incluida en la región chaqueña y conforma una gran llanura desarrollada sobre los abanicos aluviales de los ríos Pilcomayo y Bermejo. Esta llanura, con pendientes regionales muy reducidas, constituye una pobre red de evacuación para el agua superficial (Jobbágy *et al.*, 2010), razón por la cual los excesos hídricos provenientes particularmente de desbordes del río Pilcomayo, y de algunas precipitaciones, producen en forma frecuente inundaciones y redistribución de sales. El paisaje general incluye formas características: depresiones rellenas con limos arcillosos palustres, que actualmente constituyen esteros y bañados; meandros y cauces abandonados colmatados con arenas finas y limos; y fajas fluviales complejas con formaciones menores (Iriondo *et al.*, 2000; Iriondo, 2010). Estas fajas fluviales, en forma similar a los cauces actuales del Pilcomayo y Bermejo, forman albardones con depósitos sedimentarios que en ocasiones superan los tres metros de espesor, sobreimpuestos a la planicie aluvial más antigua.

El proceso de agriculturización en Formosa, implica utilización de nuevas tierras y reconversión de sistemas agrícolas, frutihortícolas y ganaderos existentes; destacándose que es una de las pocas zonas del país aptas para cultivos tropicales como banana (*Musa sp.*), papaya (*Carica papaya*) y mango (*Mangifera indica*), entre otros. En la región subtropical norte de la provincia, con epicentro en los departamentos Pilagá y Pilcomayo, el proceso comprende tanto la habilitación de zonas ribereñas ocupadas por bosques en galería, como el cambio a sistemas productivos más intensivos, con el agregado de tecnología. Esto último ocurre en los suelos de mejor aptitud, Argiudoles y Hapludoles (Morgan, 1980; Lanfranco *et al.*, 2009) ubicados en los albardones de riachos, que fueron desmontados hace ya algunos años. Estos Molisoles presentan en profundidad rasgos hidrohalomórficos, consecuencia del impedimento parcial a la infiltración profunda que constituye la planicie aluvial subyacente al albardón. En tal sentido la aplicación de paquetes tecnológicos de riego complementario en esta unidad de paisaje, debería ser evaluada en trabajos específicos.

Hart (1982) define a un agroecosistema como el resultado de las transformaciones hechas por el hombre sobre un ecosistema natural, para obtener productos animales, agrícolas y/o forestales. Dentro del agroecosistema, el suelo constituye un componente central, por lo cual resulta necesario definir su estado para evaluar la sustentabilidad del mismo, entendiendo que este término lleva implícitos tres elementos: el ecológico, el económico y el social (Goodland y Daly, 1996). Cuando la intervención realizada en el ecosistema natural o en un agroecosistema, con objeto de mejorar la productividad,

implica un marcado contraste entre la situación inicial y la buscada, cabe esperar la manifestación de fuertes impactos sobre el recurso suelo, los cuales pueden hacer peligrar la calidad del mismo. Así por ejemplo, en ambientes extremadamente planos como la llanura chaqueña Jobbágy *et al.* (2010) advierten sobre la necesidad de comprender y manejar los ciclos del agua y las sales, ya que los mismos podrían verse afectados intensamente ante cambios en el uso de la tierra.

Existen numerosas definiciones de calidad del suelo, sin embargo la mayoría de ellas acota el concepto en base a la capacidad de un suelo de cumplir con ciertas funciones. Estas funciones difieren en su enunciación según distintos autores. Así, para Doran y Parkin (1994), Karlen y Stott (1994), Karlen *et al.* (1997), estas serían: promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible); atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y favorecer la salud de las plantas, animales y humanos. Andrews *et al.* (2004), amplían el listado considerando: ciclado de nutrientes, movimiento hídrico, soporte estructural, filtro y buffer, resistencia-resiliencia y hábitat-biodiversidad.

Doran y Parkin (1994) señalaron que al momento de considerar si un sistema de manejo es sustentable en el corto y largo plazo se hace indispensable evaluar la calidad del suelo, lo cual puede realizarse mediante el empleo de indicadores.

I.2- Los indicadores de calidad de suelos y su utilización:

I.2.1- Definición

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible. Cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible dicha información (Cantú *et al.*, 2007). Giuffré *et al.* (2008) definen a los indicadores como aquellas propiedades y procesos del suelo con mayor sensibilidad a los cambios en sus funciones. Estas funciones deben cuantificarse mediante la medición de las propiedades edáficas que mejor las caractericen (Giuffré *et al.*, 2006)

I.2.2- Evolución y alcances

Las primeras aproximaciones realizadas en el estudio de la calidad de los suelos centraron su esfuerzo en la selección de un conjunto mínimo y universal de

indicadores, que fuese útil para evaluar la calidad de los suelos de todo el mundo (Karlen y Stott, 1994; Doran y Parkin, 1994). Así, proponían que los indicadores debían cumplir con: ser descriptores de procesos de los ecosistemas, integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, ser accesibles a los diferentes usuarios y aplicables en diversas condiciones de campo, ser sensibles a las variaciones de manejo y del clima, y provenir de bases de datos existentes. Sin embargo ha quedado demostrado que los indicadores apropiados para evaluar las funciones del suelo no son universales, sino que difieren según el objetivo de manejo en relación al tipo de suelo, clima y ecosistema evaluado (Giuffré *et al.*, 2008).

Existen diferentes posiciones con respecto a cómo seleccionar los indicadores adecuados para evaluar las funciones del suelo y posteriormente su calidad; no obstante es posible resaltar algunos puntos en común:

- Es necesario definir objetivos de manejo. Estos objetivos son variables y dependen de que aspecto quiera ser evaluado. Si bien suelen estar centrados en la productividad, pueden también ser sociales y ambientales (Andrews *et al.*, 2004; Giuffré *et al.*, 2008)
- Deben considerarse como indicadores a aquellas propiedades edáficas sensibles a los cambios de uso del suelo e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible (Maserá *et al.*, 1999; Astier *et al.*, 2002; Cruz *et al.*, 2004).
- El número de indicadores para evaluar la calidad de los suelos debe ser mínimo (Cantú *et al.*, 2007; Ideángelo *et al.*, 2007; Giuffré *et al.*, 2008)
- Los indicadores deben ser lo suficientemente diversos para representar las propiedades físicas, químicas y biológicas, como así mismo diferentes procesos que ocurren en el suelo (Astier *et al.*, 2002; Karlen, 2003).
- Los indicadores pueden integrarse dentro de índices comparativos de calidad de suelo (Andrews *et al.*, 2004; Giuffré *et al.*, 2008)

Una vez definida la calidad del suelo, el monitoreo de la misma puede hacerse, de manera relativa, siguiendo dos vías: comparar la evolución de un mismo sistema a través del tiempo, comparación longitudinal; o bien comparar simultáneamente sistemas de manejo alternativos, comparación transversal (Maserá *et al.*, 1999). Independientemente del camino elegido, deben identificarse los puntos críticos que podrían incidir en la calidad del suelo (Maserá *et al.*, 1999; Astier *et al.*, 2002; Cruz *et al.*, 2004) y seleccionar indicadores relacionados a estos puntos y a los atributos de la sustentabilidad (productividad, estabilidad y resiliencia).

En los últimos años se ha intensificado la evaluación de indicadores bioquímicos y biológicos (Bástida *et al.*, 2006; Trasar Cepeda *et al.*, 2008; Dkhar *et al.*, 2012). Éstos describen los principales procesos metabólicos que ocurren en el suelo, y pueden resultar indicadores tempranos y sensibles de degradación y/o restauración del mismo frente a distintos manejos (Marinari *et al.*, 2006)

I.2.3- Antecedentes en el país

En diversas regiones del país se han hecho aportes a la definición de la calidad de suelos, y el monitoreo de la misma. Estos aportes abarcan: la evaluación de cambios en variables edáficas antes distintos usos, manejos del suelo y tiempos; la definición de puntos críticos e indicadores y la creación de índices. Así por ejemplo Urricariet y Lavado (1999) estudiaron indicadores físicos, químicos y biológicos en relación al deterioro de suelos de la Pampa Ondulada. Casermeiro, *et al.* (2001) en el norte de Entre Ríos, analizaron el efecto del desmonte sobre la materia orgánica (MO), nitrógeno total, nitratos, fósforo y pH. Sanzano *et al.* (2005) compararon la influencia de diferentes sistemas de manejo sobre la degradación física y química de un Haplustol Típico en una región seca-subhúmeda de Tucumán. Cosentino, *et al.* (2007) evaluaron el grado y naturaleza de la degradación del carbono orgánico (CO), carbono liviano (CL), conductividad eléctrica (CE), pH, fósforo orgánico lábil (POI), estabilidad estructural (EE), y la distribución del tamaño de agregados, en situaciones con distintos años de agricultura, luego de la desforestación, en el Departamento Paraná, provincia de Entre Ríos. También en esta provincia, Ideángelo *et al.* (2007); Wilson *et al.* (2008), analizaron una serie de variables edáficas en busca de identificar indicadores de calidad de suelos, que les permitiesen evaluar el efecto de distintos sistemas de producción, sobre subgrupos de suelos que originalmente sustentaban bosques nativos. Entre las variables determinadas consideraron: densidad aparente, penetrometría, porosidad total, nitrógeno total, carbono orgánico total, fósforo extractable, pH, conductividad eléctrica, carbono de la biomasa microbiana y nitrógeno mineralizable, entre otras.

Casas y Puentes (2009) con referencia al Chaco semiárido, señalaron a la estabilidad estructural de los agregados, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica y nitrógeno total como variables que acusan un rápido y generalizado deterioro de las propiedades físicas y la fertilidad química de suelos desmontados y puestos en producción.

Cantú *et al.* (2007) desarrollaron un conjunto de indicadores, a partir de los cuales construyeron un índice de calidad para un Hapludol de la provincia de Córdoba. El mismo les permitió comparar los efectos de tres sistemas de manejo agrícolas, con respecto a una situación de suelo natural. Como indicadores utilizaron: CO, pH, saturación de bases, agregados estables en agua, velocidad de infiltración, densidad aparente y espesor del horizonte A.

Más recientemente, Ferreras *et al.* (2009) evaluaron parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad para diferentes manejos de Argiudoles en Marcos Juárez (provincia de Córdoba), Rafaela y Oliveros (provincia de Santa Fe).

I.2.4- Aplicación de indicadores

Los antecedentes de aplicación de indicadores son limitados. Como se ha visto hasta ahora la mayor parte de los estudios se ha centrado en identificarlos y evaluarlos, algunas veces con fines específicos, como por ejemplo Imaz *et al.* (2010), quienes identificaron a los indicadores más sensibles a los efectos de labranza y manejo de rastrojo, en suelos semiáridos mediterráneos. No obstante existen trabajos de utilización de indicadores a nivel territorial. Brogan *et al.* (2002) trabajaron en el desarrollo de una estrategia para la protección de suelos de Irlanda, en base a indicadores de calidad de suelos. De igual forma, Black *et al.* (2008) lo hicieron en el desarrollo y operación de una red de monitoreo del suelo para el Reino Unido.

I.3- Indicadores en suelos del NEA:

En la zona subtropical del noreste argentino (NEA) los antecedentes encontrados son escasos: Albanesi *et al.* (2001, 2003); Piccolo *et al.* (2004); Dalurzo *et al.* (2005); Baridón *et al.* (2012a), entre otros; y difieren en varios factores con la situación de estudio. Algunos de ellos, se corresponden a trabajos en suelos que se diferencian desde su material original y restantes factores formadores, con los Molisoles subtropicales de Formosa, objeto del presente estudio. Tal es el caso de los Ultisoles y Oxisoles evaluados por Piccolo *et al.* (2004) y Dalurzo *et al.* (2005). Otros investigadores, como Albanesi *et al.* (2001, 2003), analizaron suelos del chaco santiagueño Argiustoles y Haplustoles, con una situación climática distinta al área de estudio. En forma similar, en una zona con precipitaciones inferiores, centro oeste de Formosa, Baridón *et al.* (2012a), evaluaron cambios en el contenido y composición de la materia orgánica,

luego de 10 años de desmonte y agricultura continua en un complejo de Alfisoles. No obstante estas y otras diferencias, ambientales y edáficas, cambios asociados al contenido, componentes, dinámica y funciones de la MO han sido evaluados como posibles indicadores, y utilizados con éxito en la definición de la calidad y el monitoreo de suelos tropicales y subtropicales en el país y en el exterior (Albanesi *et al.*, 2001; Albanesi *et al.*, 2003; Espinosa, 2004; Dalurzo *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2005; Oluwatosin *et al.*, 2006; Piccolo *et al.*, 2008; Gómez *et al.*, 2008). Las variables utilizadas abarcan desde aquellas más clásicas y discutidas, como contenidos de CO y Nt, hasta las asociadas a actividad biológica, y de uso más reciente, como las determinaciones de actividad enzimática (AE). Estas últimas resultan de especial utilidad para el monitoreo de la calidad del suelo, ya que la determinación de parámetros bioquímicos se asocia a procesos microbianos claves para la conservación de la actividad metabólica del mismo (Trasar-Cepeda *et al.*, 2000; Liborio Balota *et al.*, 2004; Trasar-Cepeda *et al.*, 2008).

A partir de los antecedentes analizados surgen distintas variables propuestas para definir la calidad del suelo, sus cambios ante diferentes manejos e incluso su monitoreo; sin embargo previamente a realizar estas evaluaciones en los suelos de la región subtropical norte de Formosa, el evaluador debe plantearse cuales variables resultarán las más adecuadas como indicadores. Para la realización del presente trabajo se seleccionó en forma preliminar una serie variables, en base a algunos de los criterios antes mencionados:

- Se instituyó como área de validez y entorno de aplicación de resultados a Argiudoles y Hapludoles del albardón del riacho “El Porteño” con condiciones de manejo en secano.
- Como objetivo de manejo se estableció a la productividad biológica sostenible. Es decir, la promoción de la productividad del sistema, sin que el suelo pierda sus propiedades físicas, químicas y biológicas.
- Evaluación de un número reducido de variables, lo suficientemente diversas para representar las propiedades físicas, químicas y biológicas, asociadas a los puntos críticos señalados.
- En forma preliminar se identificaron en el área de trabajo puntos críticos que comprometen la sustentabilidad de algunos sistemas productivos, entre ellos se destacan:

1. Disminución de la materia orgánica asociada al laboreo, reducción de la cobertura del suelo y elevadas temperaturas; en particular en condiciones de agricultura continua.
2. Deterioro de la fertilidad física del suelo, la cual originalmente está condicionada por elevados contenidos de limos aluvionales, y resulta seriamente comprometida con la pérdida de MO.
3. Modificaciones en el pH y el contenido de sales, asociados a cambios de cobertura vegetal, evapotranspiración y movimiento de agua edáfica.

Las variables elegidas para ser evaluadas como posibles indicadores fueron: potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico total (COt), carbono orgánico particulado (COp), nitrógeno total (Nt), estabilidad estructural (EE), conductividad hidráulica (CH), respiración (Res), actividad de la ureasa (AUr) y actividad de la deshidrogenasa (ADh).

I.4- Fundamentos de la elección del tema

La habilitación de nuevas tierras para agricultura en la provincia de Formosa ha sido hasta ahora relativamente menor que en el resto del Gran Chaco Argentino; sin embargo su avance, que se desarrolla sobre los suelos de mejor aptitud, es un hecho concreto. Como prueba de ello el gobierno provincial impulsa actualmente el cambio de uso en casi 300.000 ha, dentro de programas de interés estratégico para la promoción y desarrollo de sistemas agroproductivos (MPyA, 2009). Esto dentro del marco del plan de ordenamiento territorial aprobado por la provincia (POT-For) que contempla una posible expansión del área cultivada (incluyendo pasturas) de hasta 2,5 millones de ha. Estas reconversiones ya se han iniciado sobre los suelos de mayor potencialidad productiva, entre los que se destacan los Argiudoles y Hapludoles, con posibilidades de riego complementario y disponibilidad de infraestructura básica como por ejemplo: caminos asfaltados, red eléctrica y proximidad a centros urbanos, entre otros. Una demostración de esto es el desarrollo de nuevas tecnologías para el mejoramiento genético e industrial de la producción de Banana, realizado en el área de “Misión Tacaaglé” por el Centro Experimental de Transferencia de Tecnologías Agropecuarias (CEDEVA), dependiente de la provincia, declarado de interés parlamentario por la

Honorable Cámara de Diputados de la Nación (Comisión de Agricultura y Ganadería, 2008).

En el noreste de la provincia el agua del subsuelo presenta elevados contenidos salinos, por lo cual la posibilidad de riego complementario se encuentra condicionada, casi con exclusividad, a la utilización de cursos superficiales de agua. Esta fuente de provisión, a la vez, presenta limitaciones en cuanto a la estacionalidad de los caudales y concentración de sales disueltas. Ante esta problemática, la provincia, tiene en marcha un plan de obras hidráulicas de regulación, almacenamiento y derivación, destinadas a resolver el déficit crónico de abastecimiento de agua para consumo humano y expandir la oferta de agua para riego y ganadería rural durante el periodo de sequía, que se extiende aproximadamente durante la mitad del año. Dentro de estas obras se destacan las realizadas y proyectadas sobre el curso del “Riacho El Porteño”. El mismo es uno de los riachos de mayor importancia de la provincia ya que atraviesa la mitad del territorio provincial longitudinalmente, brindando grandes posibilidades de desarrollo a su área de influencia (Departamento Hidrología, Prov. de Formosa, 1985). El área de trabajo seleccionada, con centro en la localidad de Misión Tacaaglé, se encuentra sobre el albardón de este riacho, y resulta representativa de aproximadamente 150.000 ha, donde se asientan numerosos establecimientos agropecuarios. Según la Unidad Provincial Coordinadora del Agua (UPCA) las obras sobre el cauce del “Riacho El Porteño”, tendrán influencia sobre aproximadamente 500.000 ha; 40.000 ha regables, 90.000 ha de uso agrícola y 370.000 ha para uso ganadero (Silva, 2008).

El avance en el conocimiento de cambios físicos, químicos y microbiológicos que se producen en Argiudoles y Hapludoles subtropicales de Formosa, frente a diferentes usos, y la selección de indicadores de calidad constituirían un aporte de importancia al monitoreo de la misma frente al proceso de agriculturización.

I.5- Hipótesis y objetivos.

- Hipótesis:

- Distintos usos de suelos subtropicales en Formosa han producido cambios significativos en variables físicas, físico-químicas, químicas y biológicas de los mismos.

- El análisis de las modificaciones en estas variables hace factible la identificación de un conjunto de indicadores de calidad del suelo.
- Variables asociadas al contenido, composición y dinámica de la Materia Orgánica integrarían los principales indicadores de calidad en Argiudoles y Hapludoles subtropicales. Entre estos indicadores se destacan: carbono orgánico total (COT), carbono orgánico particulado (COp), nitrógeno total (Nt), estabilidad estructural (EE), respiración (Res) y actividad enzimática (AE)

- Objetivos generales:

- Identificar indicadores de calidad para Argiudoles y Hapludoles subtropicales
- Comprobar si dentro del conjunto de indicadores identificados, aquellos asociados a la Materia Orgánica resultan los de mayor peso.
- Definir un procedimiento para la individualización de indicadores de calidad del suelo a partir de la evaluación de cambios físicos, físico-químicos, químicos y microbiológicos resultantes de la agriculturización en suelos subtropicales.

-Objetivos parciales:

- Determinar variables edáficas sensibles a distintos usos del suelo
- Establecer el peso individual de estas variables sobre la variabilidad total medida en el suelo ante los usos confrontados.

I.6- Estructura esquemática de la Tesis.

Un planteo esquemático de la estructura del presente trabajo de tesis se realiza en la Figura 1. El mismo tiene por objetivo facilitar al lector el seguimiento conceptual del mismo.

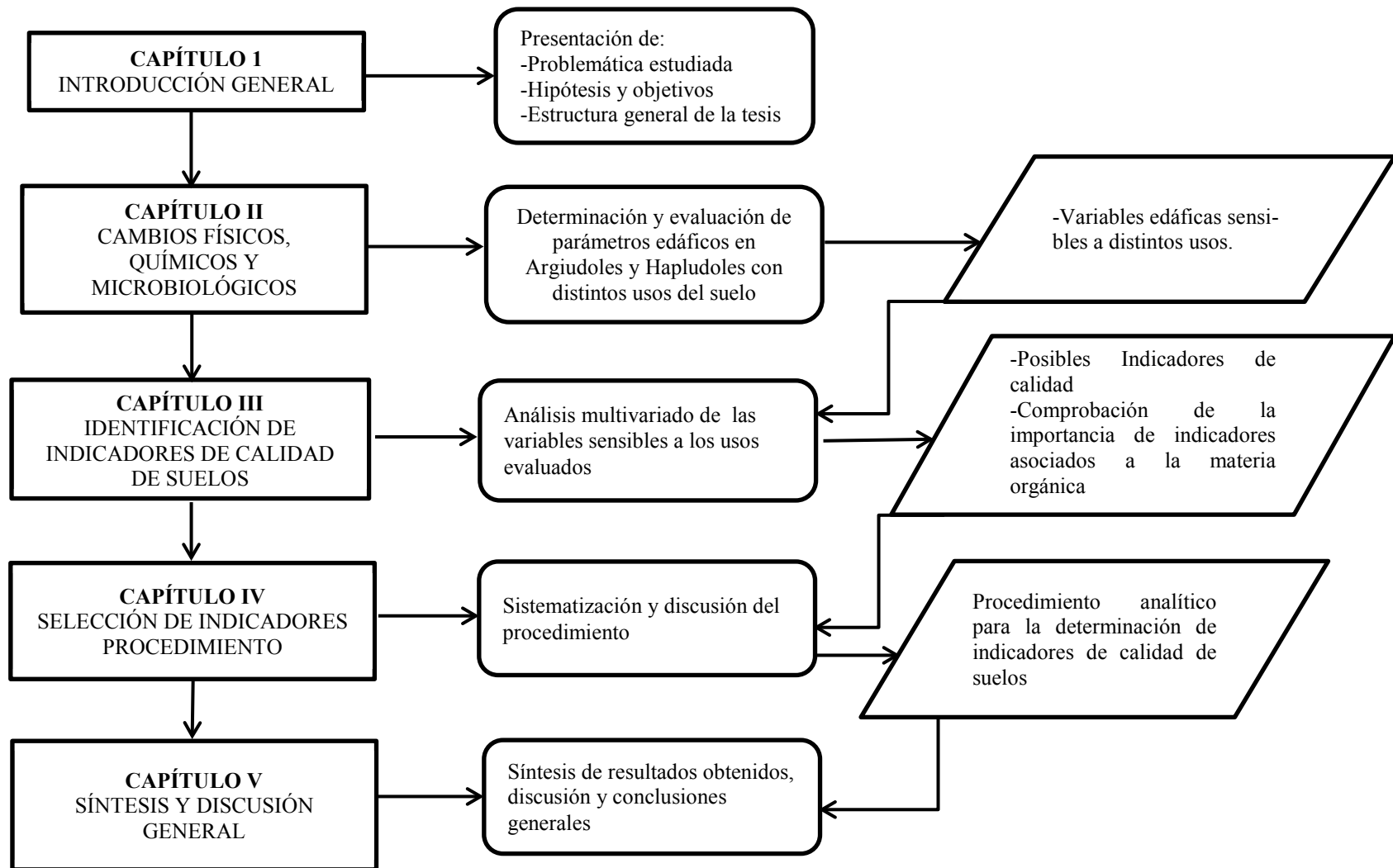


Figura 1. Estructura esquemática de la tesis.

CAPÍTULO II

CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

II.1- Introducción.

Ha quedado establecido que los suelos de mejor aptitud de uso agrícola, ganadero y forestal, de la provincia de Formosa, se encuentran en los albardones de ríos y riachos (Morgan, 1980; INTA, 1990). Argiudoles y Hapludoles desarrollados en la zona Subtropical noreste de la provincia, Departamentos de Pilagás y Pilcomayo, han recibido y reciben una mayor presión de uso (Lanfranco *et al.*, 2009), debido a condiciones climáticas que favorecen el desarrollo de los cultivos, incluso algunos cultivos tropicales. Así resulta que Argiudoles y Hapludoles que originariamente soportaban un bosque nativo, actualmente sustentan cultivos de soja, maíz y algodón, pasturas, generalmente monoespecíficas, montes frutales de pomelo y banana, y en algunos casos relictos del monte nativo con diferentes niveles de degradación debida a la saca selectiva de madera y al pastoreo. Más de 20 años de diferentes usos de estos Molisoles han generado cambios en el valor de algunos parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo. Estos cambios pueden no resultar importantes en sí mismos; pero si lo son en la medida en que afecten a la calidad o salud del suelo, la cual ha sido definida por varios autores (Doran y Parkin, 1994; Karlen y Stott, 1994; Karlen *et al.*, 1997; Andrews *et al.*, 2004; entre otros) como la capacidad de los mismos de cumplir con ciertas funciones edáficas, antes mencionadas. Doran y Parkin (1994) fueron de los primeros en señalar la necesidad de evaluar la calidad del suelo para definir si un sistema de manejo es sustentable en el corto y largo plazo.

Casermeiro, *et al.* (2001), Sanzano *et al.* (2005), Cosentino, *et al.* (2007), Casas y Puentes (2009), son solo algunos de los investigadores que han realizado aportes a la definición de la calidad de los suelos en distintas regiones del país.

La detección de variables sensibles a los distintos manejos de Argiudoles y Hapludoles subtropicales no es sinónimo de calidad del suelo; pero constituye un primer paso hacia la identificación de sus posibles indicadores.

Los objetivos del presente capítulo fueron:

- Determinar variables físicas, químicas y/o biológicas que han resultado sensibles a distintos usos del suelo.
- Establecer, a través de sistemas productivos representativos de cada uso, cuál de ellos resultó más compatible con un sistema sustentable desde el punto de vista edáfico.

II.2- Materiales y métodos

II.2.1- El área de trabajo:

Se trabajó en un área de aproximadamente 21.000 ha, ubicada sobre el albardón del riacho “El Porteño”, al NO del Departamento Pilagás, Provincia de Formosa, 24° 59’ S., 58° 33’ O. (Figura 2). La misma se caracteriza por una intensa actividad agrícola, ganadera y frutihortícola.



Figura 2. Ubicación esquemática del área de trabajo.

El curso de agua denominado riacho “El Porteño” (Figura 3) se ubica en el abanico aluvial del Río Pilcomayo. Las nacientes del riacho se encuentran, en el sector intermedio de este abanico en la provincia de Formosa, que comprende los antiguos esteros de Patiño (Iriondo *et al.*, 2000). Durante los últimos siglos el Pilcomayo desembocó en esta depresión tectónica la cual terminó de rellenar con sedimentos hacia 1980 (Iriondo, 2010), dando origen a un proceso de avulsión generalizada que hace retroceder el cauce a razón de 10 a 35 Km por año. Actualmente, los derrames del Río Pilcomayo, atraviesan el humedal denominado “Bañado La Estrella”, aguas abajo a la altura de la Ruta Prov. N° 28 su descarga abastece al riacho “Salado” (que alimenta a su vez la Laguna La Salada) y a un paleocauce que constituye el origen del riacho “El

Porteño”. Sin embargo “El Porteño” conforma un cauce permanente a partir de la laguna La Salada, tal como se señala en la Figura 4 (en color celeste) y continua en dirección sureste, pudiendo asociarse a una de la fajas fluviales que Iriondo (2010) caracteriza como complejas, con cauces abandonados y formaciones menores.

El riacho transita sobre un albardón que el mismo ha producido, aparentemente estabilizado. Este albardón comprende a su vez a un conjunto de paleocauces, meandros colmatados, lagunas, esteros y riachos menores; con condiciones de escurrimiento muy complejas ya que las aguas que ocupan superficies deprimidas forman bañados, que en épocas de lluvia se conectan entre si estableciendo un escurrimiento mantiforme.



Figura 3. Fotografía del riacho “El Porteño”, a la altura de Misión Tacaaglé.

A lo largo de los 350 Km que recorre de Oeste a Este por el Norte de la Provincia El riacho “El Porteño” forma numerosos meandros, y se encuentra sobre elevado respecto a la llanura circundante (entre 1 a 3 metros), lo que provoca la imposibilidad de recibir aportes de precipitaciones locales a través de escurrimiento superficial. Unos 100 Km antes de su desembocadura y formado ya parte del sector distal del abanico aluvial del río Pilcomayo (Iriondo *et al.*, 2000), recibe descargas hídricas de tres esteros, y un riacho afluente en los siguientes lugares:

- Espinillo desde el Estero Bacaldá
- Punta Ghía desde la Laguna Primavera
- San Juan desde el Estero Guazú
- Inmediaciones de la localidad de Clorinda, desde el “Riacho Porteño”, su afluente activo más importante.

El agua dulce de flujos locales, asociados a precipitaciones, descarga en los esteros antes mencionados y de estos al riacho “El Porteño”. Los flujos de aguas subterráneas intermedios o regionales explicados por Toth (2000), con mayor o menor concentración salina según el recorrido del agua desde su ingreso al suelo y los materiales por donde circula, no han sido evaluados en la región. Observaciones propias y de otros investigadores permiten hipotetizar que la napa freática que se encuentra debajo del albardón se vincularía con el riacho.

“El Porteño” finalmente descarga sus aguas en el Pilcomayo inferior, a unos 20 Km. de su confluencia con el río Paraguay, por lo que su descarga se ve influenciada por el nivel de este último.

La fuerte estacionalidad de las precipitaciones en la alta cuenca del Río Pilcomayo y consecuentemente de los caudales, que presenta un período de aguas altas (crecida) comprendido entre los meses de marzo/abril a agosto/septiembre, y otro de aguas bajas (estiaje) que se extiende a los meses restantes, produce importantes limitaciones de cantidad y calidad de agua para abastecer las demandas actuales, que incluyen consumo humano, consumo animal y en menor escala, riego complementario.

La temperatura media anual es de 22-23°C, lo que ubica al área en uno de los climas más calurosos de la Argentina. Los meses más cálidos abarcan de septiembre a abril, con temperaturas media mensual de 21-28°C y temperaturas máximas medio-mensuales de 31-36 ° C. Las temperaturas máximas se registran en los meses de diciembre y enero, con una máxima absoluta de 45°C. Estas características tropicales se ven alteradas por penetraciones de masas de aire frío austral que determinan violentas disminuciones térmicas. El período libre de heladas se extiende entre octubre y abril, con mayor frecuencia de heladas entre los meses de mayo y agosto.

La precipitación media anual es de 1242 mm, concentrándose el 75% de las mismas en la época estival, de noviembre a marzo. La evapotranspiración potencial anual de 1300

mm, hace clasificar a la zona de estudio como la de más alta evapotranspiración potencial dentro de la Argentina (Burgos y Vidal, 1951).

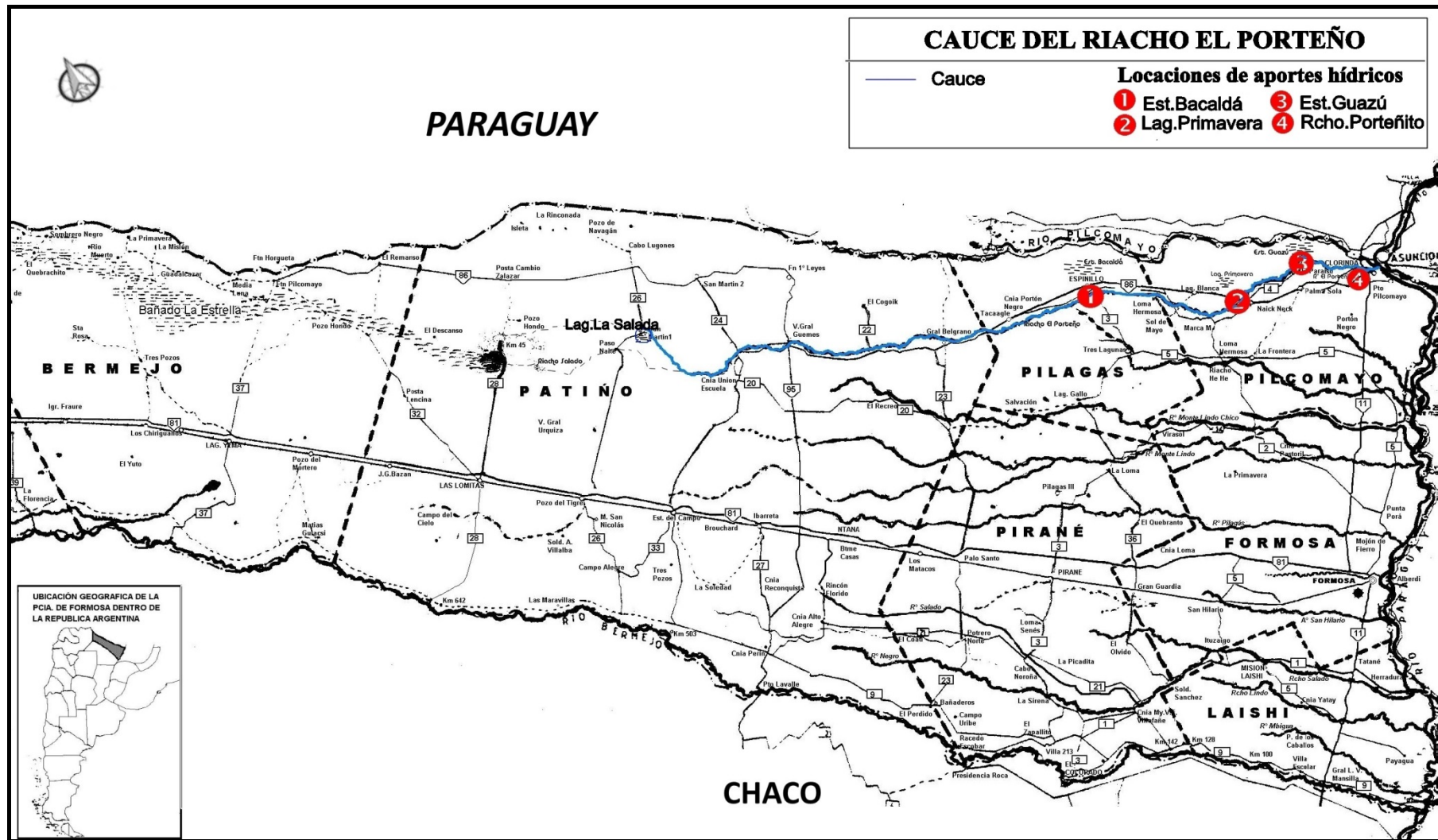


Figura 4. Cauce del riacho “El Porteño”

II.2.2- Los suelos de estudio:

El albardón del “Riacho El Porteño” constituye un domo aluvional de desarrollo longitudinal, con un curso de agua principal, más o menos central, de fuerte divagación meándrica, sobre impuesto a una planicie aluvional más antigua, Planicie del Río Pilcomayo. Sobre el albardón existen diferentes unidades fisiográficas en las cuales se reconocen suelos que, con distinta participación, integran complejos. Los componentes taxonómicos más relevantes de estos complejos son: Hapludol Típico, Argiudol Típico, Udorthent Típico, Natrudalf Típico y Natracualf Típico (Morgan, 1980; Lanfranco *et al.*, 2009). Argiudoles y Hapludoles constituyen los suelos de mayor potencialidad productiva, consecuentemente aquellos en donde el proceso de agriculturización ha sido y es más intensivo.

Se realizó una zonificación preliminar de unidades fisiográficas, en base al análisis de antecedentes y a la interpretación de imágenes satelitales mediante técnicas de clasificación supervisada. Las unidades fueron replanteadas en el campo, se convalidaron antecedentes y se identificaron los suelos asociados a cada una. Se seleccionaron aquellas unidades en donde Argiudoles y Hapludoles resultaron dominantes en los complejos de suelos (participación > 50%). En éstas se realizó la descripción morfológica, analítica y clasificación taxonómica, a nivel de “gran grupo”, de los suelos mediante la apertura de calicatas en perfiles modales. Las descripciones morfológicas se hicieron en base a las normas de reconocimientos y muestreo de suelos del USDA (NRCS, 2002); la taxonomía se ajustó a *Soil Taxonomy* (NRCS, 2010)

II.2.3- Identificación de Sistemas Productivos Representativos (SPR):

Se definieron e identificaron sistemas productivos representativos de los distintos usos del suelo en el área de estudio. Los SPR identificados fueron:

- Monte nativo (Mn)
- Agricultura continua (Ac)
- Pastura (P)
- Fruticultura (F)

Sobre el albardón del riacho y a lo largo de 60 Km de su curso, se seleccionaron tres localidades: Misión Tacaaglé, El Espinillo y Buena Vista, en inmediaciones de las

cuales estaban presentes los cuatro SPR sobre complejos de suelos dominados por Argiudoles y Hapludoles.

La identificación de los SPR se realizó a partir de información de sensores remotos: imágenes satelitales del CBERS-2B (satélite chino-brasileño) provistas por el INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brazil*) e imágenes Google; el procesamiento de imágenes se realizó utilizando el software ENVI. Mediante trabajo de campo se analizaron y definieron los SPR en función de la historia agrícola: cultivos, rotaciones predominantes y utilización de insumos, entre otras. Se seleccionó a la clase más frecuente de cada SPR, que fue tomada como situación de muestreo. La caracterización de los SPR, en base a la clase más frecuente hallada, es la siguiente:

- Monte nativo (Mn): Está representado por un monte de especies nativas degradado por pastoreo, apertura de picadas y entresacas de madera. El mismo presenta un estrato alto, de más de 14 m de altura, en proximidades del riacho, dominado por: timbó colorado (*Enterolobium contortisiliquum*), lapacho rosado (*Tabebuia heptaphylla*), guayaibí (*Patagonula americana*), espina de corona (*Gleditsia amorphoides*) y laurel blanco (*Ocotea diospyrifolia*); entre otros. A medida que se distancia del riacho la altura del monte decrece a menos de 10 metros y resulta dominado por ñandubay o espinillo (*Prosopis affinis*), urunday (*Astronium balansae*), palo piedra (*Diplokeleba floribunda*), con inclusiones de palma blanca o caranday (*Copernicia alba*).
- Agricultura continua (Ac): Corresponde a áreas desmontadas hace 25 años (± 2). Los cultivos históricos fueron maíz y algodón; en los últimos 10 años el cultivo de algodón se ha desplazado a suelos de menor aptitud, ha disminuido el de maíz y se ha incrementado el de soja. Es sistema de labranza es convencional, siendo de uso frecuente el arado de discos *rome plow* o *big rome*.
- Pastura (P): Corresponde a áreas desmontadas hace 25 años (± 2) en donde han predominado pasturas de baja calidad forrajera, en general monoespecíficas, siendo la especie utilizada con más frecuencia el Dicantio (*Dichanthium spp.*) Las pasturas se utilizan durante períodos medios de 4 años. Es común que en algún año se intercale un cultivo agrícola.
- Fruticultura (F). La actividad frutícola se centra principalmente en dos cultivos plurianuales: el pomelo y la banana. La clase más frecuente se corresponde con plantaciones de más de 20 años (± 2) (de ambos cultivos). Existen plantaciones comerciales de menor edad (10 años) manejadas en forma más intensiva.

II.2.4- Diseño del muestreo

El muestreo se realizó sobre Argiudoles y Hapludoles en las tres áreas antes mencionadas: Misión Tacaaglé, El Espinillo y Buena Vista. En cada una de ellas se utilizó un diseño aleatorio estratificado. Los estratos estuvieron constituidos por cuatro situaciones de uso, representadas por los SPR: Monte nativo (Mn), considerado como uso testigo; Agricultura continua (Ac); Pastura (P) y Fruticultura (F). En cada estrato, por área, se distribuyeron al azar 9 sitios para el muestreo de Hapludoles y Argiudoles indistintamente. En cada sitio, se extrajo una muestra compuesta (por 5 submuestras) a las siguientes profundidades: 0 a 10 cm, 20 a 40 cm y 40 a 60 cm. Por área de muestreo se tomaron 108 muestras de suelo, 36 a cada profundidad. En las situaciones de Monte nativo y Fruticultura, las muestras se tomaron fuera de la proyección de copa del árbol, y en la línea de plantación, entre árboles, para el caso Fruticultura. Se excluyeron, como puntos de muestreo, a las situaciones de microrrelieve negativo dentro de los complejos, asociables a Natrudalf, y los suelos de menor desarrollo y texturas más gruesas asociables a Udorthent.

El muestreo indiferenciado en Argiudoles y Hapludoles se fundamentó en que:

- La mayor parte de las variables se evalúan en un epipedón mólico, presente en ambos grandes grupos.
- Relevamientos preliminares pusieron de manifiesto que la productividad de ambos suelos resulta similar, y en ningún caso el horizonte diagnóstico subsuperficial ha presentado un contenido de arcilla que pueda constituir una limitante a la producción.
- De existir modificaciones en el pH y/o CE, ocasionadas por los distintos usos, estas deberían evidenciarse en ambos suelos

II.2.5- Variables edáficas evaluadas

Sobre las muestras superficiales (0-10 cm) se realizaron las siguientes determinaciones: pH (pHs), método potenciométrico; Conductividad eléctrica (CEs), por conductimetría del extracto de saturación; Carbono orgánico total (CO_t), método de Walkley Black; Carbono orgánico particulado (CO_p), Galantini (2005); Nitrógeno Total (Nt), método de Kjeldahl; estabilidad estructural, Le Bissonnais, (1996); conductividad hidráulica, método de carga constante en muestras disturbadas; Respiración y Actividad enzimática (deshidrogenasa y ureasa) (García *et al.*, 2003)

En las muestras subsuperficiales (20-40 cm, 40-60 cm) se evaluó pH y CE.

II.2.6- Análisis estadísticos

A efectos de caracterizar el comportamiento de las variables se realizó la evaluación de los datos obtenidos mediante técnicas de estadística descriptiva. La comparación de medias se realizó mediante el test de diferencias mínimas significativas de Fisher.

II.3- Resultados

II.3.1- Los suelos estudiados.

II.3.1.a- Zonificación edáfica

La zonificación edáfica realizada en las tres áreas de trabajo, se presenta en las figuras 5, 6 y 7. En las mismas se identificaron dos geoformas: la llanura aluvional del río Pilcomayo, unidad cartográfica “Palmar” (*Pa*) y el albardón del riacho “El Porteño”. La unidad “Palmar” se corresponde con la planicie aluvional más antigua del Río Pilcomayo, mientras que el albardón del “Riacho El Porteño” constituye un domo aluvional de desarrollo longitudinal, con un curso de agua principal, más o menos central, de fuerte divagación meándrica, sobre impuesto a la unidad *Pa*.

Como se ha mencionado anteriormente los suelos con mejor aptitud agrícola se encuentran en la unidad albardón, área de este estudio. En la misma, siguiendo los criterios presentados por Lanfranco *et. al.*, (2009, 2011), se diferenciaron cinco unidades fisiogeográficas a partir de las cuales se definieron las unidades cartográficas: Costas (Co), Meandros colmatados (Mc), Paleocauces (Pc), Bajos transicionales (Bt) y Lagunas (L).

A continuación se describen las unidades cartográficas presentes en el albardón del riacho.

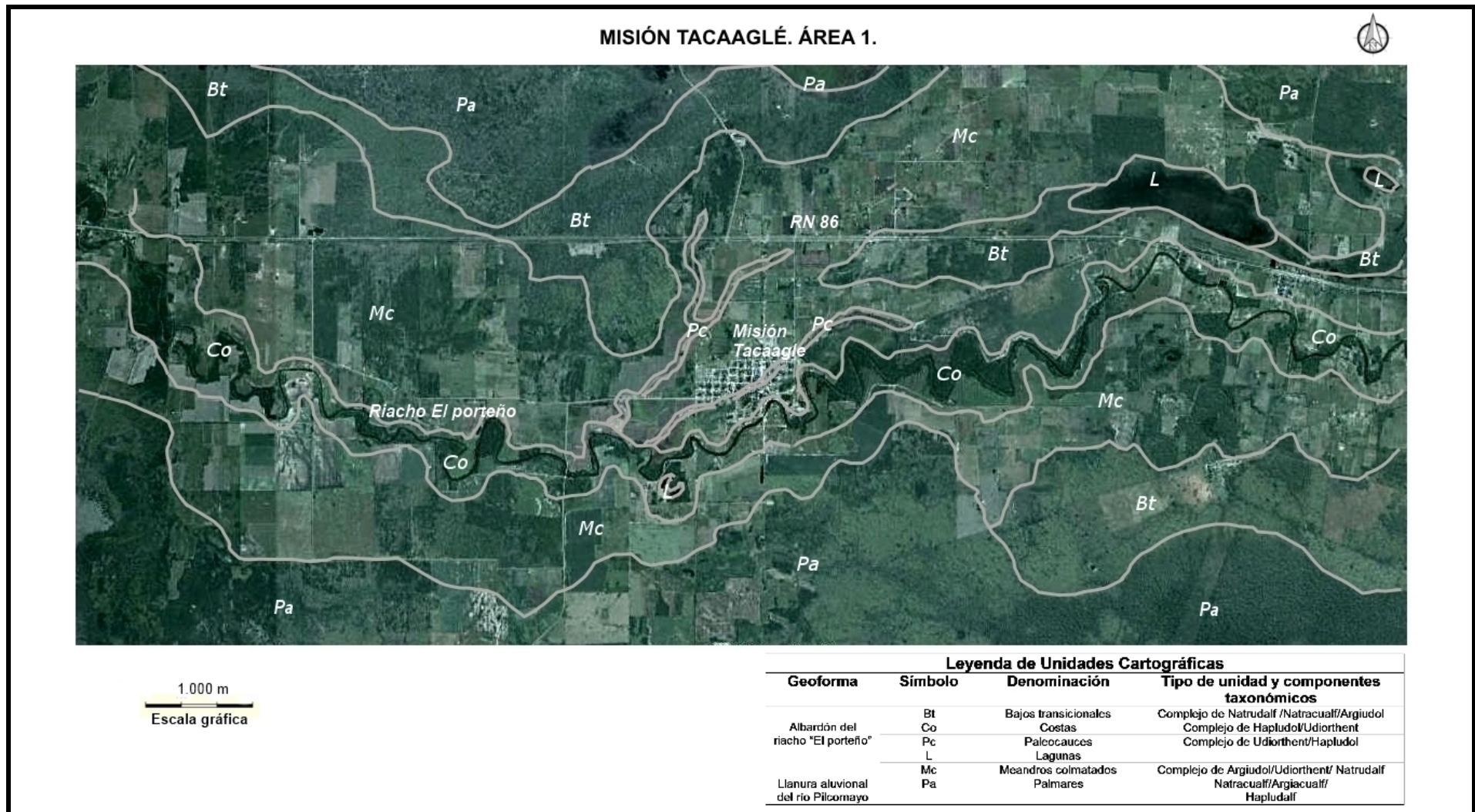


Figura 5. Zonificación edáfica del área 1, Misión Tacaaglé.

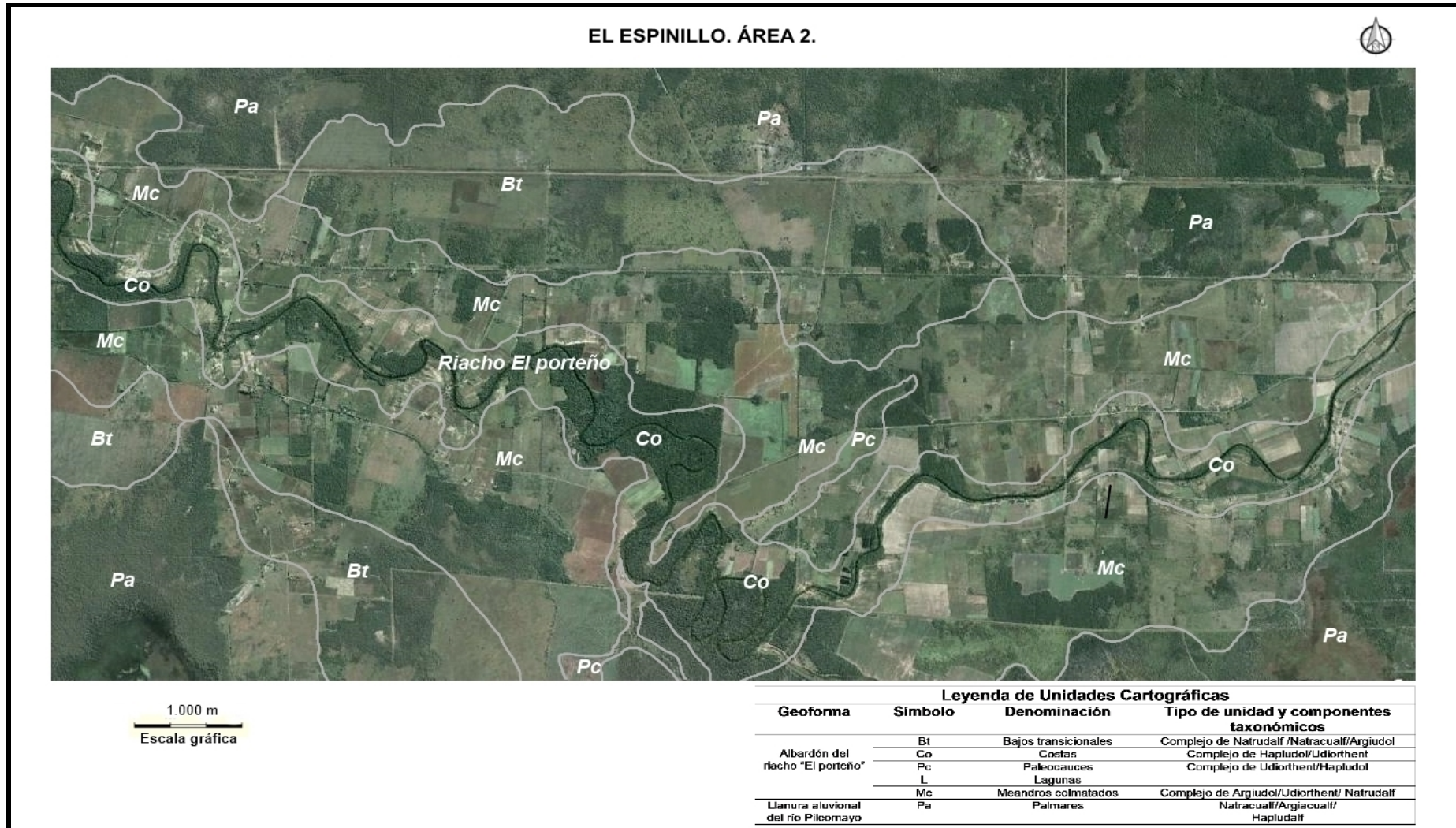


Figura 6. Zonificación edáfica del área 2, El Espinillo.

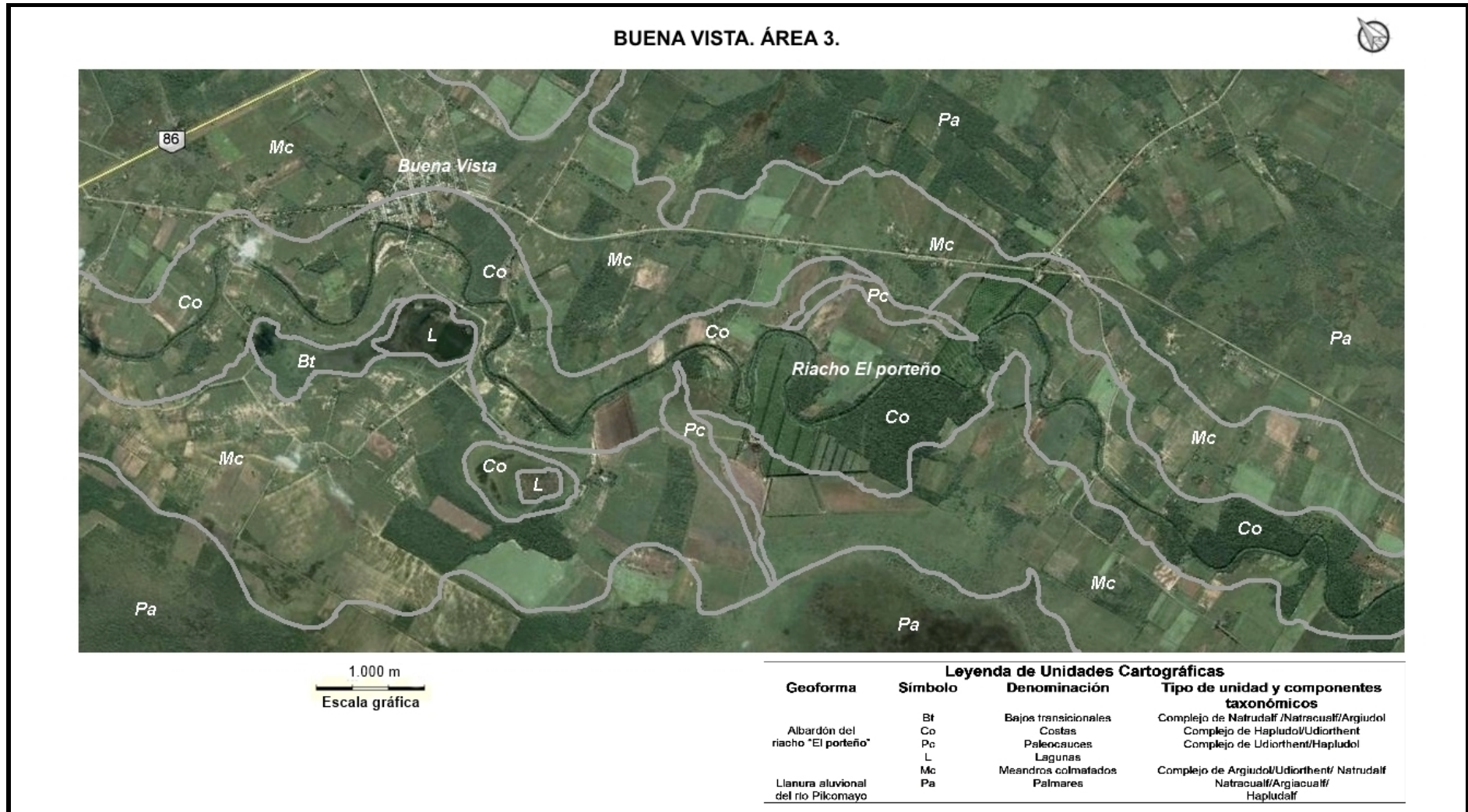


Figura 7. Zonificación edáfica del área 3, Buena Vista.

- Costas (Co):

La unidad “Costas” está integrada por un complejo de suelos dominado por Hapludoles y Udorthentes de formación aluvional. Estos se han desarrollado en los planos más altos del relieve, a ambos márgenes del Riacho El Porteño; su vegetación original era de bosque alto en galería. La composición textural de los suelos está dominada por la fracción limo. Frecuentemente presentan distintos grados de afectación salina asociada a la elevada carga de sales que estacionalmente transporta el riacho (mayor a 4 dS.m^{-1})

- Unidad Meandros colmatados (Mc):

La unidad “Meandros colmatados” ocupa planos medios del relieve. Representa la unidad con mayor representatividad areal dentro del albardón del riacho. Está conformada por un complejo de suelos cuyos integrantes se asocian a las diferentes posiciones del microrrelieve. Argiudoles, Udorthentes y Natrudalfes son los suelos dominantes del complejo. Su vegetación original era la de bosque de mediana altura.

- Unidad Paleocuces (Pc):

La unidad “Paleocuces” presenta una muy baja representatividad areal en la zona de estudio. Como su nombre lo indica, está genéticamente asociada a antiguos cauces de agua. La vegetación natural es una pradera dominada por gramíneas comúnmente definida como “espartillar”. Ocupa zonas medianas a bajas del relieve y conforma un complejo de suelos donde Hapludoles y Udorthentes son los suelos más frecuentes. Predominan texturas más gruesas que en el resto de la zona, lo que genera que sean algo excesivamente drenados.

- Unidad Bajos transicionales (Bt):

Los “Bajos transicionales” se encuentran formados por un complejo de Natrudalfes, Natracualfes y Argiudoles que ocupan las partes más bajas del relieve, dentro del albardón. La granulometría más fina y su posición topográfica condicionan el mal drenaje y las condiciones de hidromorfismo frecuente. La vegetación original es de bosque bajo y palmar.

II.3.1.b- Descripción de perfiles representativos de los Hapludoles y Argiudoles identificados.

Hapludol.

Localización: 24° 58'43,4'' latitud Sur, 58° 48'14,7'' longitud Oeste.

Unidad geomorfológica: Albardón del riacho "El porteño"

Unidad cartográfica: "Costa"

Vegetación actual: Sorgo de cobertura sobre desmonte reciente.

Ap 0 a 10 cm; pardo grisáceo (10 YR 4/1) en seco, pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo; limoso a franco limoso; bloques subangulares a granular, fina, moderada; blando, friable, ligeramente plástico, no adhesivo; raíces abundantes; límite abrupto y plano.

A 10 a 20 cm; pardo grisáceo (10 YR 4/1) en seco, pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2) en húmedo; limoso a franco limoso; migajosa, fina, fuerte; blando, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite abrupto y plano.

Bw 20 a 40 cm; pardo claro (10 YR 6/3) en seco, pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3) en húmedo; franco limoso; bloques subangulares, finos, fuertes; duro, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces comunes; límite claro y plano.

C 40 a 60 cm; pardo muy claro (10 YR 7/4) en seco, pardo (10 YR 4/4) en húmedo; franco limoso; masivo; duro, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces escasas; límite claro y plano.

C2 60 a +140 cm; pardo muy claro (10 YR 7/3) en seco, pardo (10 YR 5/4) en húmedo; franco limoso; masivo; duro, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; eflorescencias salinas comunes a partir de 120 cm

Napa freática no detectada hasta los 3 m de profundidad.

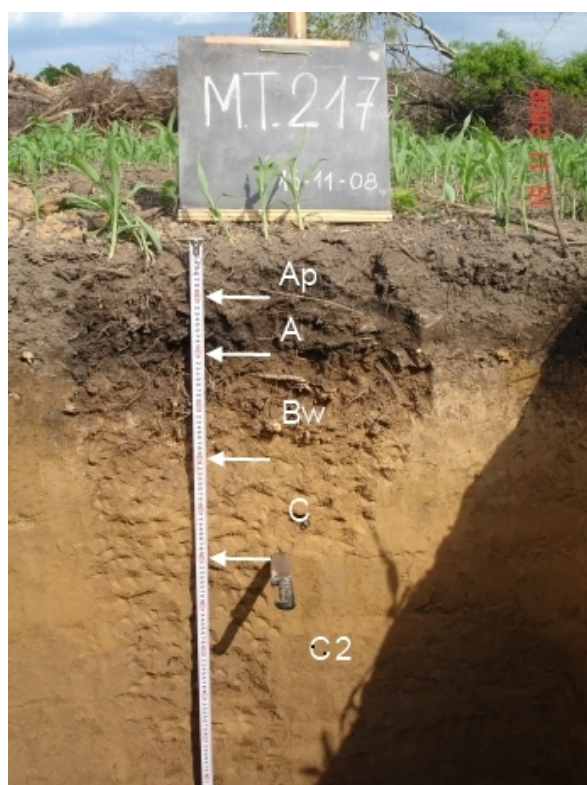


Figura 8. Perfil representativo de un Hapludol

Tabla 1. Descripción analítica del perfil representativo de un Hapludol

Horizonte	Ap	A	Bw	C	C2
Profundidad [cm]	0-10	10-20	20-40	40-60	60-140+
COt [g.kg ⁻¹]	33	31	3	nd	nd
M.O. [g.kg ⁻¹]	57	53	5,16	nd	nd
Nt [g.kg ⁻¹]	3,2	2,8	nd	nd	nd
C / N	10,3	11,0	nd	nd	nd
pH (1:2,5)	6,8	6,8	7,11	7,25	8,22
C.E. [dS.m ⁻¹]	1,9	1,2	0,84	0,84	2,58
C.I.C. (T) [cmol _c .kg ⁻¹]	18,5	19,1	10,2	8,1	8,1
Ca ⁺⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	11,3	13,1	6,9	nd	nd
Mg ⁺⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	4,4	4,0	2,3	nd	nd
Na ⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	0,9	0,5	0,2	nd	nd
K ⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	1,7	1,2	0,8	nd	nd
Suma de bases (S)	18,3	18,8	10,2	nd	nd
Saturación (S/T) [%]	98,9	98,4	100	nd	nd
PSI [%]	4,9	2,6	2,0	nd	nd
CO ₃ ⁼ (reacción)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)

Clase textural	FL	FL	FL	FL	FL
Arena [%]	3,9	4,9	6,0	8,7	3,9
Limo [%]	78,2	76,8	74,3	73,2	78,4
Arcilla [%]	17,9	18,3	19,7	18,1	17,7
P (Olsen) [mg.kg ⁻¹]	36	30	nd	nd	nd

nd: no determinado

El perfil descrito corresponde un suelo con elevada representatividad en la unidad *Costas* (mayor al 75 %) y moderada representatividad en la unidad *Paleocauces* (de 25 a 50 %). En la morfología del perfil se observa una evolución edáfica definida, con diferenciación de horizontes, translocación de coloides y movimientos de sales. Superficialmente se observa melanización escasa y elevada humificación con un alto enriquecimiento en Carbono orgánico (COt). Asociado a ello el tenor de Nitrógeno es alto. El contenido de Fósforo extractable (método de Olsen) en los horizontes superficiales es elevado. Estos aspectos evidencian una alta fertilidad natural del sistema, para las plantas que componen la selva en galería. La lixiviación de arcillas es moderada y define horizontes iluviales que, si bien presentan barnices de arcilla, no cumplen las exigencias clasificatorias de un B textural, por lo cual fueron clasificados como Bw (B cámbico). La estructura del suelo posee expresión definida en los horizontes.

Existe un lavado superficial de sales y luego una acumulación en todos los horizontes más profundos que se tornan salinos. Las sales más frecuentes son los Cloruros y Sulfatos de Calcio en superficie, para incrementarse los de Sodio en profundidad, hecho que se pone de manifiesto a través del incremento en los valores de pH. Si bien en este perfil no se evidenciaron rasgos de hidromorfismo hasta la profundidad descrita, la naturaleza de las sales presentes podría señalar una influencia de napa freática y de flujos de agua subterránea de largo recorrido. En profundidad se aprecias Carbonatos de Calcio que ponen de manifiesto la disminución de la actividad biológica.

Se realizaron prospecciones con barreno hasta 3 metros de profundidad, sin encontrar la napa freática.

El suelo descrito como representativo se corresponde con los requerimientos taxonómicos de los Hapludoles, no obstante las concentraciones salinas en profundidad, la influencia del ambiente halohidromórfico subyacente al albardón y la posible influencia de la napa freática, hacen que éste se aparte del concepto central del gran grupo taxonómico.

Argiudol.

Localización: 24° 58' 56.1'' latitud Sur, 58° 51' 40'' longitud Oeste.

Unidad geomorfológica: Albardón del riacho "El porteño"

Unidad cartográfica: "Meandros colmatados"

Vegetación actual: pradera

Ap 0-10 cm. Pardo grisáceo (10 YR 5/2) en seco, gris muy oscuro (10 YR 3/1) en húmedo; franco limoso; granular fino, moderado; ligeramente duro, friable, ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite abrupto y plano.

A 10-23 cm. Pardo grisáceo (10 YR 5/2) en seco, gris muy oscuro (10 YR 3/1) en húmedo; franco limosa; bloques sub-angulares finos, fuerte; duro, friable, ligeramente plástico y ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite abrupto y plano.

Bt 23-53 cm. Pardo claro (10 YR 6/3) en seco, pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3) en húmedo; franco limosa; prismas gruesos, moderado; moderadamente duro, friable, moderadamente plástico y moderadamente adhesivo; barnices moderados; raíces moderadas; límite claro y plano.

BC 53-80 cm. Pardo muy claro (10 YR 7/3) en seco, pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3) en húmedo; franco limosa; bloque medios, débil; duro, friable, moderadamente plástico y moderadamente adhesivo; concreciones de carbonatos de calcio moderadas; muñequillas de carbonato de calcio; barnices escasos; raíces escasas; límite claro y plano.

C 80-100 cm. Pardo muy claro (10 YR 7/3) en seco, pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3) en húmedo; franco limosa; masivo; duro, friable, moderadamente plástico y moderadamente adhesivo; carbonatos abundantes en la masa; concreciones de hierro y manganeso abundantes; moteados escasos; raíces ausentes; límite claro y plano.

2C 100-170 + cm . Pardo muy claro (10 YR 7/3) en seco, pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3) en húmedo; arcillo limosa; masivo; extremadamente duro y friable, muy plástico y muy adhesivo; moteados abundantes; carbonatos abundantes en la masa.

Napa freática detectada a 2,4 metros de profundidad



Figura 9. Perfil representativo de un Argiudol

Tabla 2. Descripción analítica del perfil representativo de un Argiudol

Horizonte	Ap	A	Bt	BC	C	2C
Profundidad [cm]	0-10	10-23	23-53	53-80	80-100	100-170
COt [g.kg ⁻¹]	25	17	nd	nd	nd	nd
M.O. [g.kg ⁻¹]	42	29	nd	nd	nd	nd
Nt [g.kg ⁻¹]	2,0	1,4	nd	nd	nd	nd
C / N	12,3	11,9	nd	nd	nd	nd
pH (1:2,5)	7,30	6,04	6,62	8,7	8,84	8,84
C.E. [dS.m ⁻¹]	1,86	1,16	0,8	0,78	0,96	1,29
C.I.C. (T) [cmol _c .kg ⁻¹]	11,9	11,8	10,3	7,6	8,0	15,6
Ca ⁺⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	8,5	8,1	6,9	nd	nd	12,2
Mg ⁺⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	2,0	2,0	3,3	nd	nd	8,4
Na ⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	0,6	1,0	0,4	0,6	0,9	1,7
K ⁺ [cmol _c .kg ⁻¹]	0,9	0,6	0,2	0,2	0,2	0,5
Suma de bases (S)	12,0	11,7	10,8	nd	nd	22,9
Saturación (S/T) [%]	100	99,4	100,0	nd	nd	100,0

PSI [%]	5,04	8,5	4,4	8,4	11,6	11,2
CO ₃ ⁼ (reacción)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)
C / N	12,3	11,9	nd	nd	nd	nd
Clase textural	F L	F L	F L	F L	F L	arc L
Arena [%]	7,4	3,5	3,5	2,5	5,0	1,0
Limo [%]	74,2	75,6	74,4	79,1	71,6	52,2
Arcilla [%]	18,4	20,9	22,2	18,4	23,4	46,8
P (Olsen) [mg.kg ⁻¹]	31	9	nd	nd	nd	nd

nd: no determinado

El perfil descripto representa al suelo con mayor participación en la unidad *Meandros colmatados*, llegando en algunos casos a ocupar el 75 % del complejo; en la unidad *Bajos transicionales*, representa aproximadamente 30 %. Es un suelo de formación aluvional desarrollado en los planos altos y medios del relieve que ha adquirido estabilidad en la continua evolución de los suelos de la zona, favorecido por su drenaje moderado y la naturaleza limosa de los materiales originales. La arcilla heredada es predominantemente illítica. Se observa una evolución edáfica bien marcada con diferenciación de horizontes, translocación de coloides y movimientos de sales. Superficialmente se observa melanización y humificación con un moderado enriquecimiento en carbono orgánico en los horizontes A, y aparición de signos de iluviación en horizontes Bt (B argílico). La estructura del suelo presenta una expresión definida en los primeros horizontes. A los 80 cm de profundidad se observan rasgos hidromórficos representados por moteados y concreciones ferrromangánicas abundantes que resultan coincidentes con un marcado incremento en la concentración de sodio, evidenciada a través del pH. A un metro de profundidad se detecta un cambio textural abrupto que caracteriza una discontinuidad litológica (2C), producto de distintos aportes fluviales. La profundidad a la que se encuentran discontinuidades de este tipo resultó variable.

Prospecciones realizadas con barreno permitieron encontrar la napa freática a 2,4 metros de profundidad.

El suelo descripto como representativo se corresponde con los requerimientos taxonómicos de los Argiudoles, no obstante la presencia de rasgos hidromórficos a 80 cm, y el incremento de la sodicidad en profundidad lo apartan del concepto central del gran grupo taxonómico. Así mismo la condición de sodicidad, la influencia de la napa

freática, y el eventual ascenso de la misma, deberán ser considerados para posibles desarrollos con riego complementario.

II.3.2- Los Sistemas Productivos Representativos (SPR) y la selección de las zonas de trabajo.

Sobre la zonificación de suelos realizada se seleccionaron como áreas de trabajo a aquellas unidades cartográficas en donde Argiudoles y Hapludoles resultaron los grandes grupos dominantes de los complejos de suelos (participación > 50%). Dichas unidades fueron “Meandros colmatados” (Mc) y “Costas” (Co), Figuras 5, 6 y 7. En las mismas, mediante la apoyatura de imágenes de satélite y trabajo de campo se ubicaron los SPR y se distribuyeron al azar los puntos de muestreo en cada área.

II.3.3- Evaluación de cambios físicos, químicos y biológicos en los suelos.

La evaluación de las variables edáficas se efectuó en las tres unidades de muestreo en forma conjunta, analizando el efecto del área de muestreo sobre la varianza de cada parámetro, a fin de descartar posibles efectos debidos a un incremento en las precipitaciones medias anuales que existe en la zona de NO a SE. Los valores medios de las variables evaluadas en Hapludoles y Argiudoles con distintos usos, la existencia de diferencias estadísticas significativas y sus desvíos estándar, sobre el total de casos analizados, se presentan en la Tabla 3. En la misma se observa que los valores medios de pH superficial (pHs), ligeramente ácidos en todos los casos, presentan diferencias estadísticas; sin embargo su rango de variación, 6,3 a 6,6, no resultaría de relevancia desde el punto de vista agronómico. Asimismo se aprecia que no existen problemáticas de salinidad en superficie y los distintos usos no han modificado la CE superficial (CEs).

Tabla 3. Valores medios de las variables analizadas en función del uso del suelo

Uso	pHs	CEs	COT	COp	Nt	Res.	ADh	AUr	EE	CH	pH	pH	CE	CE
		[dS.m ⁻¹]		[g.kg suelo ⁻¹]		[μg CO ₂ . g ⁻¹ . día ⁻¹]	[μg.ml ⁻¹]	[μg N-NH ₄ . g ⁻¹ .h ⁻¹]	DMP[mm]	[cm.h ⁻¹]	(20-40cm)	(40-60cm)	(20-40cm)	(40-60cm)
Mn	6,32 _a σ=0,33	0,65 _a σ=0,18	27,71 _b σ=6,88	9,44 _d σ=3,59	2,35 _b σ=0,60	30,65 _a σ=9,11	26,04 _c σ=12,53	717,10 _d σ=223,16	1,97 _c σ=0,41	1,18 _b σ=0,44	6,11 _a σ=0,52	6,64 _a σ=0,65	2,20 _b σ=2,43	2,45 _b σ=3,92
Ac	6,30 _a σ=0,26	0,71 _a σ=0,33	19,19 _a σ=5,37	2,61 _a σ=1,27	1,78 _a σ=0,49	59,27 _b σ=14,5	10,63 _a σ=2,26	252,47 _a σ=40,41	0,74 _a σ=0,27	0,45 _a σ=0,25	7,04 _b σ=0,39	7,40 _b σ=0,69	0,86 _a σ=0,42	0,74 _a σ=0,50
P	6,65 _b σ=0,53	0,63 _a σ=0,31	34,56 _c σ=13,0	7,57 _c σ=2,27	3,07 _c σ=0,80	76,88 _c σ=26,2	17,59 _b σ=2,90	525,76 _c σ=43,10	2,22 _c σ=0,75	1,58 _c σ=0,73	7,64 _c σ=0,36	8,01 _c σ=0,30	2,73 _b σ=1,33	2,91 _b σ=1,27
F	6,62 _b σ=0,49	0,86 _a σ=0,43	22,90 _a σ=3,67	4,84 _b σ=1,66	1,83 _a σ=0,35	23,41 _a σ=13,54	13,78 _a σ=4,96	383,40 _b σ=139,46	1,05 _b σ=0,34	0,38 _a σ=0,36	7,71 _c σ=0,71	8,08 _c σ=0,43	2,31 _b σ=1,29	2,89 _b σ=1,41

pH superficial (pHs) ; conductividad eléctrica superficial (CEs); carbono orgánico total (COT); carbono orgánico particulado (COp); nitrógeno total (Nt); actividad respiratoria (Res); actividad de la deshidrogenasa (ADh); actividad de la ureasa (AUr); estabilidad estructural (EE); conductividad hidráulica (CH); desvío estándar (σ). Letras distintas señalan diferencias significativas. p=0,01

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

COt, COp, Nt, Res, ADh, AUr, EE, CH, tanto como las variables subsuperficiales pH y CE, presentaron diferencias significativas entre los distintos usos del suelo razón por la cual se amplía la descripción estadística de su comportamiento

II.3.3.a - Carbono orgánico total (COt)

El resumen estadístico de los valores de COt, sin selección o transformación matemática de datos, se presenta en la Tabla 4. La misma permite observar algunas particularidades en la distribución de valores de COt. En la situación de P la distribución se aparta de la normalidad, quedando de manifiesto en los valores de asimetría y curtosis. Así también existe una relación mayor a 3 entre los desvíos estándar de F y P, lo cual comprometería el principio de homocedasticidad (homogeneidad de la varianza) requerido para los análisis paramétricos.

Tabla 4. Resumen estadístico de COt en función del uso del suelo

USO	Promedio (g.Kg ⁻¹)	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	19,19 a	5,37	28,00	12,8	31,1	18,3	1,42	-0,66
F	22,90 a	3,67	16,02	18,1	32,5	14,4	1,02	0,01
Mn	27,71 b	6,88	24,81	16	45,2	29,2	0,90	0,32
P	34,56 c	12,99	37,60	11,6	80,7	69,1	3,96	6,12
Total	26,09	9,80	37,58	11,6	80,7	69,1	9,01	18,95

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

El ANOVA considerando los efectos del uso del suelo, área de muestro, y su posible interacción, Tabla 5, señaló la existencia de diferencias significativas en cuanto al efecto uso del suelo ($p \leq 0,01$). Desde el punto de vista práctico, la no significancia del efecto “área de muestreo” y la ausencia de interacción entre el uso del suelo y el área de muestreo confirman que los distintos contenidos de COt son debidos al uso del suelo indistintamente del área en donde se tomaron las muestras.

En la Figura 10 puede observarse que las variaciones del COt en los distintos usos sigue la misma tendencia en las tres áreas de muestreo.

Tabla 5. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre COt, ANOVA.

	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-f	Valor-p
Efectos principales					
A=Uso	3567,31	3	1189,1	81,57	0,000
B=Área de muestreo	75,12	2	37,56	2,58	0,156
Uso*Área de muestreo	87,4704	6	14,5784	0,21	0,972
Residuo	6556,59	96	68,2978		
Total (corregido)	10286,5	107			

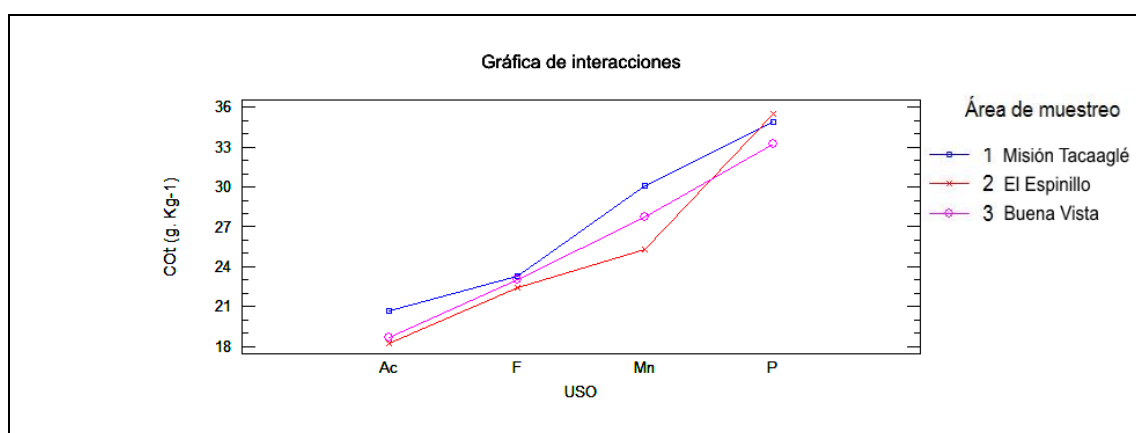


Figura 10. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el COt.

Luego de 25 años de utilización de distintos sistemas productivos, los contenidos de carbono orgánico total (COt) en los primeros 10 cm de suelo, evidenciaron diferencias significativas (Tabla 3). Los usos agricultura continua (Ac) y fruticultura (F), con valores similares de COt y sin diferencias estadísticas entre ellos (Figura 11), originaron una disminución del mismo con respecto a la situación de monte nativo (Mn), considerada como testigo. Esta disminución fue de 17,36 %, con uso frutícola; y de 30,75 % en condiciones de agricultura continua. Contrariamente, la implantación de praderas (P) produjo un incremento de 24,72 % en el contenido de COt.

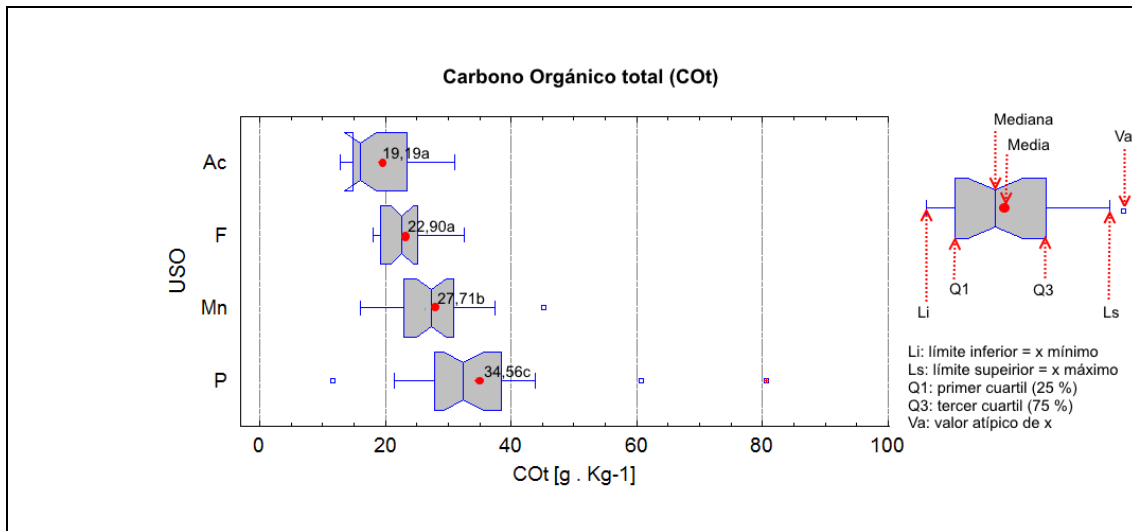


Figura 11. Carbono orgánico total (COT) en función del uso del suelo.

Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.3.b- Carbono orgánico particulado (COp)

El resumen estadístico de los valores de COp, en función del uso del suelo, se presenta en la Tabla 6. En la misma se visualiza como particularidad que en Ac la distribución de valores de COp se aparta de la normalidad, presentando una asimetría que se manifiesta en el sesgo estandarizado superior a 2.

El ANOVA considerando los efectos del uso del suelo, área de muestreo, y su posible interacción, Tabla 7, señaló la existencia de diferencias significativas en cuanto al efecto uso del suelo ($p \leq 0,01$) y al “área de muestreo”. Los distintos valores de COp son debidos al uso del suelo. El área de muestreo ha tenido un efecto sobre el contenido de COp, con valores superiores en el área 2 (El Espinillo). Sin embargo la ausencia de interacción entre el uso del suelo y el área de muestreo, Tabla 7, determina que las variaciones del COp entre usos sigan la misma tendencia en las tres áreas, Figura 12.

Tabla 6. Resumen estadístico de COp en función del uso del suelo

USO	Promedio (g.Kg ⁻¹)	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	2,61 a	1,27	48,43	0,99	5,91	4,92	2,33	1,06
F	4,84 b	1,66	34,27	1,97	7,8	5,83	0,32	-0,75
Mn	9,44 d	3,59	37,97	3,66	16,61	12,95	1,04	-0,81
P	7,57 c	2,27	29,97	3,93	14,05	10,12	1,08	1,13
Total	6,12	3,50	57,27	0,99	16,61	15,62	3,60	1,04

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Tabla 7. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre COp, ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	731,53	3	243,84	123,88	0,000
B=Área de muestreo	94,55	2	47,28	24,02	0,001
Uso*Área de muestreo	11,81	6	1,97	0,40	0,879
Residuo	474,97	96	4,95		
Total (corregido)	1312,86	107			

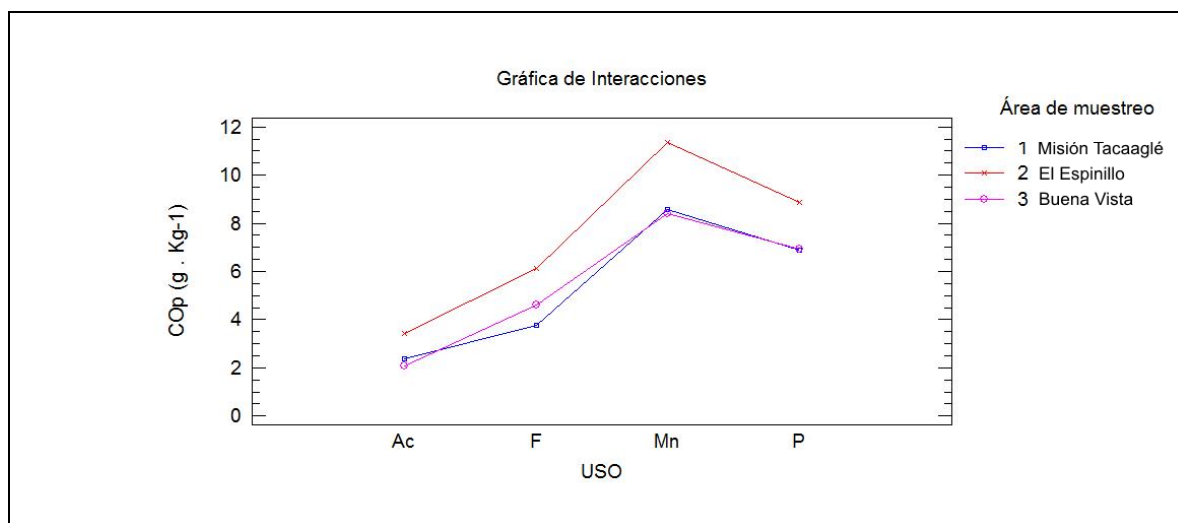


Figura 12. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el COp.

En todos los sistemas productivos se observó una disminución significativa del contenido de carbono orgánico particulado (COp) con respecto al testigo (Tabla 6). La mayor pérdida se presentó en Ac, donde el carbono asociado a la fracción gruesa de los agregados disminuyó un 72,35 %, seguido por F, con una disminución de 48,73 % y en

última instancia P donde se perdió un 19,81 % del COp. El contenido medio de COp en sistemas de P ha disminuido significativamente en sus valores medios con respecto al Mn; pero no así en sus valores más frecuentes representados por las medianas (Figura 13), lo cual debe analizarse conjuntamente a la gran dispersión de valores en este último, tal como se observa en el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 13.

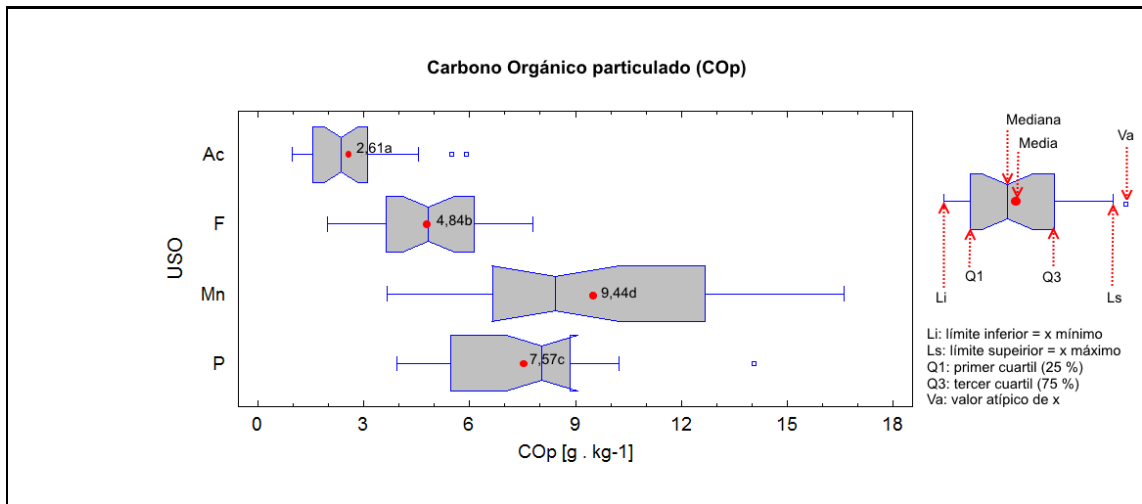


Figura 13. Carbono orgánico particulado (COp) en función del uso del suelo.

Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.3.c- Nitrógeno Total (Nt)

Las variaciones en el contenido de Nt con respecto al uso Mn siguieron la tendencia del COt. En el resumen estadístico de sus valores en función del uso del suelo, Tabla 8, se observa que la distribución de los mismos para el uso P se aparta de la normalidad, en cuanto a su asimetría y curtosis.

Tabla 8. Resumen estadístico de Nt en función del uso del suelo

USO	Promedio (g.Kg ⁻¹)	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtósis est.
Ac	1,78 a	0,49	27,22	1,1	2,7	1,6	0,17	-1,32
F	1,83 a	0,35	19,28	1,23	2,67	1,44	0,97	0,35
Mn	2,35 b	0,60	25,74	1,22	3,2	1,98	-1,05	-0,74
P	3,07 c	0,80	26,05	1,82	5,3	3,48	2,95	2,51
Total	2,26	0,78	34,46	1,1	5,3	4,2	4,74	5,28

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Se encontraron diferencias significativas entre contenidos medios de Nt, en distintos usos del suelo, no existiendo efectos estadísticos del área de muestreo, ni interacciones entre estas y los usos del suelo, Tabla 9. No obstante en la gráfica de interacciones de la Figura 14 se observa claramente un comportamiento fuera de la tendencia general de los valores medios, para Nt en el área de muestreo 1 (Tacaaglé) para el uso frutícola.

Tabla 9. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre Nt, ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	29,26	3	9,75	27,5	0,000
B=Área de muestreo	0,00	2	0,00	0,01	0,995
Uso*Área de muestreo	1,46	6	0,24	0,69	0,656
Residuo	34,04	96	0,35		
Total (corregido)	64,77	107			

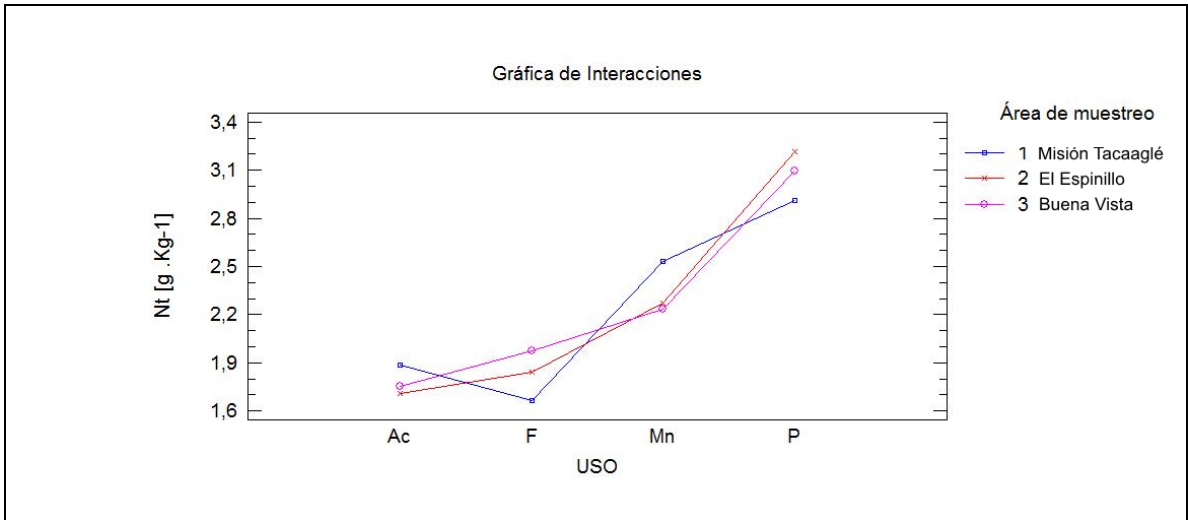


Figura 14. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el Nt.

El contenido medio de Nt, al igual que sus valores más frecuentes (medianas), ha disminuido en las situaciones de Ac y F, sin presentar diferencias significativas entre estos usos (Figura 15), lo cual se condice con el comportamiento del COt (Figura 11). La implantación de praderas originó un incremento de 30,64 % en el contenido de Nt con relación a Mn, valor que resulta superior al incremento de 24,72 % registrado en el contenido de COt. La Figura 15 permite también observar la falta de normalidad en la distribución de valores para el uso P.

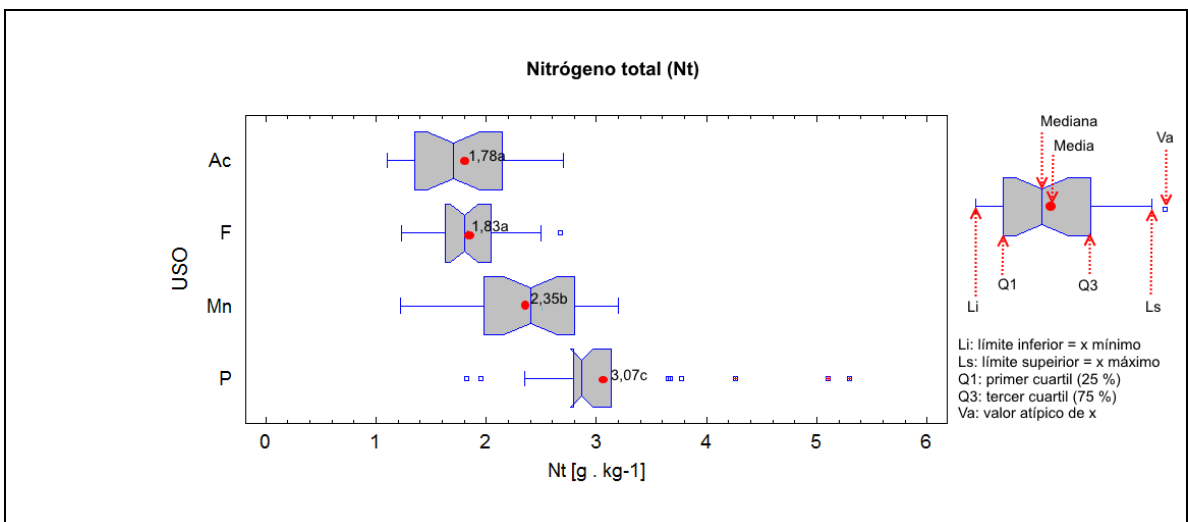


Figura 15. Nitrógeno total (Nt) en función del uso del suelo. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

II.3.3.d- Actividad respiratoria (Res)

Los valores de la actividad respiratoria del suelo presentaron una distribución normal y homogeneidad de la varianza en todos los casos; con excepción de una asimetría, que se observa en la distribución para el uso F, Tabla 10.

Tabla 10. Resumen estadístico de actividad respiratoria (Res) en función del uso del suelo.

USO	Promedio [µg CO ₂ . g ⁻¹ . día ⁻¹]	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	41,49 b	10,15	24,47	24,03	57,52	33,49	-0,77	-1,03
F	16,39 a	9,48	57,84	6,54	42,85	36,31	2,74	1,29
Mn	21,46 a	6,38	29,74	9,71	37,92	28,21	0,49	0,54
P	53,82 c	18,36	34,12	22,47	93,84	71,37	0,69	-0,59
Total	33,29	19,22	57,74	6,54	93,84	87,3	3,36	0,47

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Los diferentes sistemas productivos originaron sobre la respiración edáfica diferencias significativas, no evidenciándose un efecto del área de muestreo ni interacción entre estos factores (Tabla 11). En la Figura 16 se observa la misma tendencia de los valores en las tres áreas de muestreo

Tabla 11. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre Res., ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	24685,1	3	8228,35	62,68	0,000
B=Área de muestreo	521,295	2	260,648	1,99	0,143
Uso*Área de muestreo	1715,55	6	285,924	2,18	0,053
Residuo	12603,2	96	131,283		
Total (corregido)	39525,1	107			

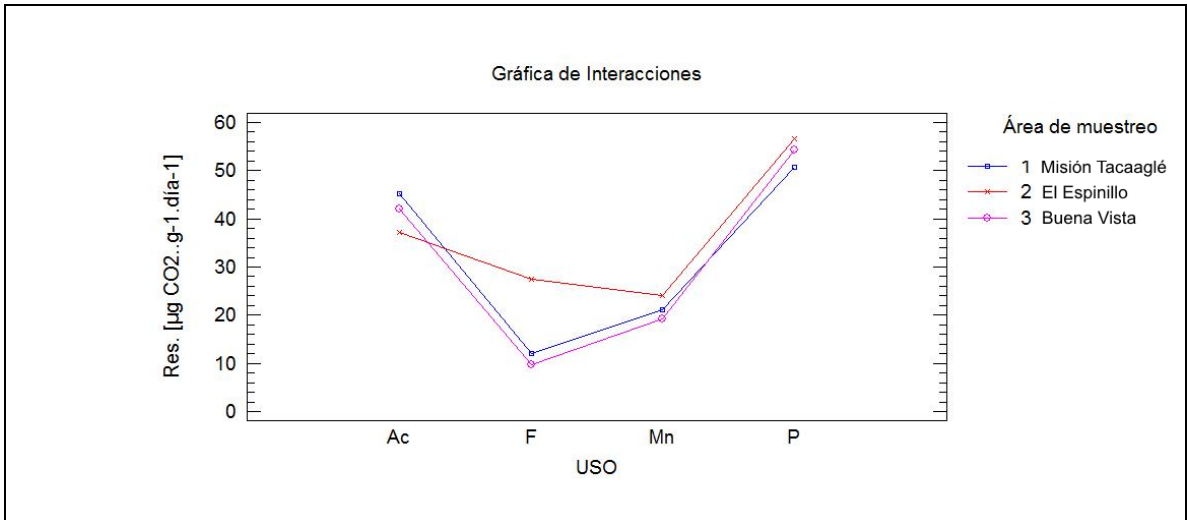


Figura 16. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la Res.

Los valores de medios de respiración presentaron diferencias estadísticas entre los usos P y Ac, resultando a la vez superiores a los valores obtenidos en Mn y F (Figura 17). La menor actividad respiratoria se registró en el uso frutícola, sin diferencias significativas con el Mn testigo. La mayor actividad respiratoria se midió en la situación de P, con un incremento de 150,8 % con respecto al Mn, mientras que en Ac el aumento fue de 93,4 %.

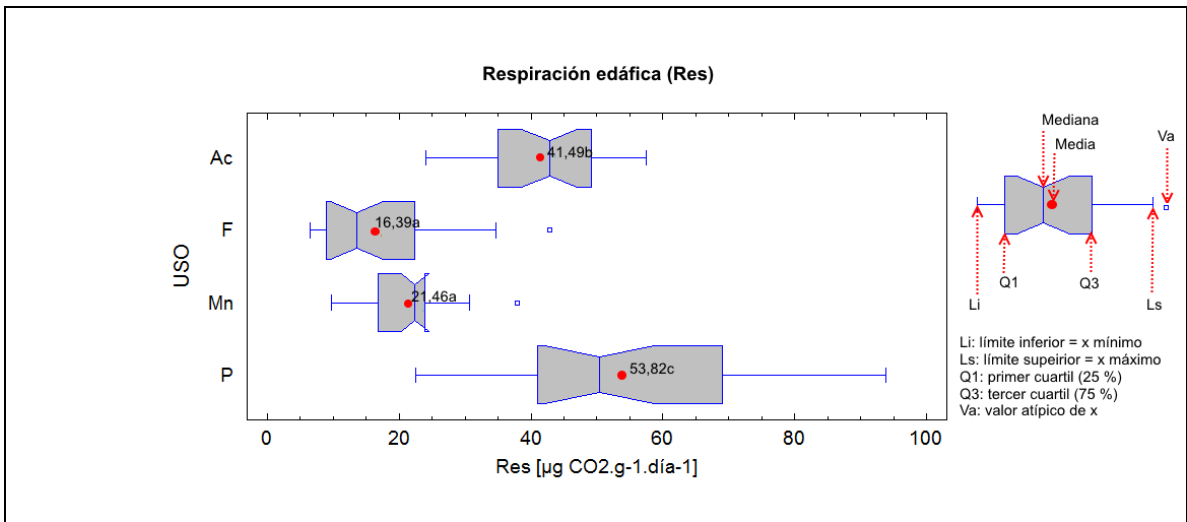


Figura 17. Actividad respiratoria en el suelo (Res) en función del uso.

Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.3.e- Actividad enzimática de la deshidrogenasa (ADh)

La descripción estadística de los valores de la actividad de la deshidrogenasa en los distintos usos del suelo, Tabla 12, pone de manifiesto la existencia de asimetría en las distribuciones de Ac y Mn. Así también se aprecia la posible falta de homogeneidad de la varianza debida al valor del desvío estándar para los datos de Mn, en relación, por ejemplo, al de Ac (relación > 3).

Para el empleo de análisis paramétricos se haría necesario corregir estas distribuciones.

Tabla 12. Resumen estadístico de ADh en función del uso del suelo.

USO	Promedio [µg.ml ⁻¹]	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est	Curtósis est.
Ac	10,63 a	2,26	21,22	7	17	10	2,08	1,41
F	13,78 a	4,96	35,97	2	22	20	-0,81	-0,17
Mn	26,04 c	12,53	48,14	8	60	52	2,06	1,18
P	17,59 b	2,90	16,48	13	24	11	0,61	-0,53
Total	17,01	9,00	52,91	2	60	58	8,84	13,61

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Diferentes usos del suelo han originado diferencias significativas en la actividad de la deshidrogenasa en los primeros 10 cm de suelo. No se ha evidenciado un efecto del área de muestreo ni interacción entre esta y el uso del suelo sobre ADh, Tabla 13. En la Figura 18 se observa la misma tendencia de los valores en las tres áreas de muestreo

Tabla 13. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre ADh, ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	3590,55	3	1196,85	23,16	0,000
B=Área de muestreo	36,2407	2	18,1204	0,35	0,705
Uso*Área de muestreo	77,7593	6	12,9599	0,25	0,958
Residuo	4960,44	96	51,6713		
Total (corregido)	8664,99	107			

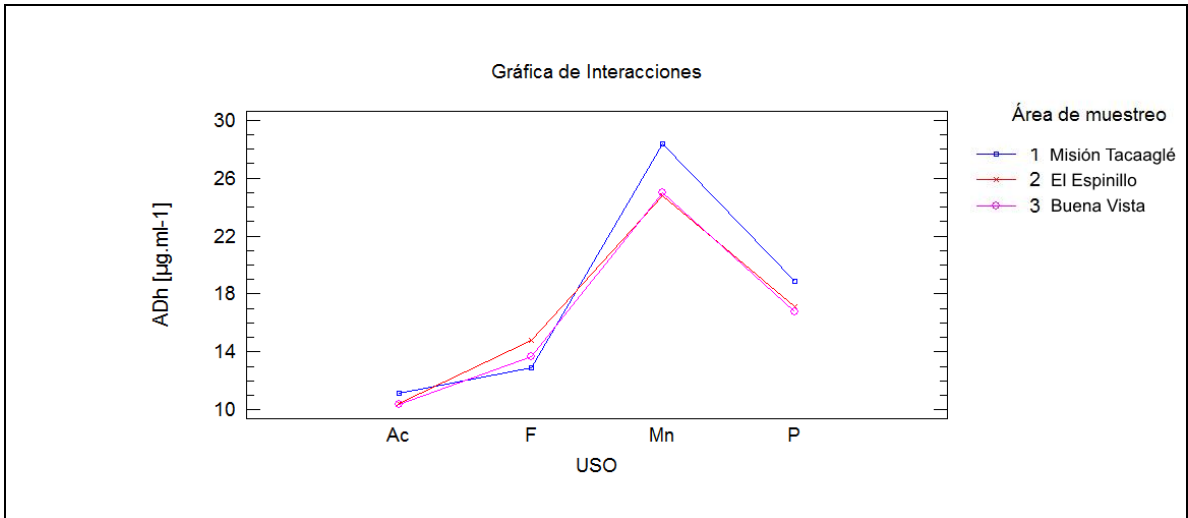


Figura 18. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la ADh.

La actividad de la deshidrogenasa (ADh) presentó diferencias estadísticamente significativas excepto entre los usos Ac y P (Figura 19). La mayor diferencia se encontró en Ac, con una disminución de 59,18 % con respecto a la ADh de monte nativo. El uso P originó una reducción de 32,45 % en la actividad de esta enzima.

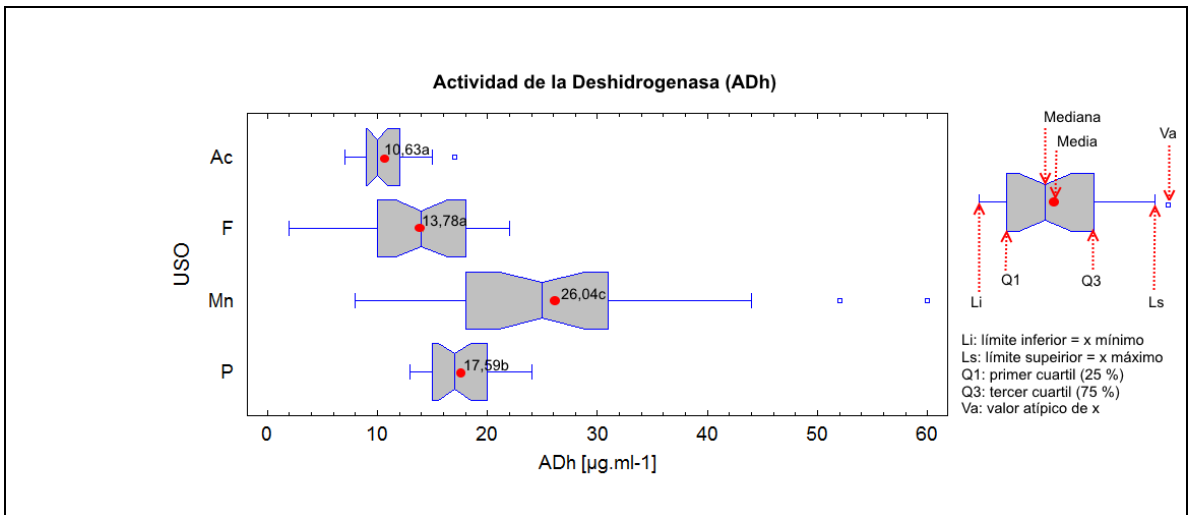


Figura 19. Actividad de la deshidrogenasa en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.3.f- Actividad enzimática de la ureasa (A_{Ur})

La distribución de valores de la actividad de la ureasa en los distintos usos del suelo, Tabla 14, sigue una distribución normal en todos los SPR considerados. Se observa también en la misma Tabla la posible falta de homogeneidad de la varianza debida al valor del desvío estándar para los datos de Mn, en relación, por ejemplo, al de Ac (relación > 3), en forma análoga a lo registrado para actividad de la deshidrogenasa

Tabla 14. Resumen estadístico de A_{Ur} en función del uso del suelo.

Uso	Promedio ($\mu\text{g N-NH}_4\text{.g}^{-1}\text{.h}^{-1}$)	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est	Curtosis est.
Ac	252,47 a	40,41	16,01	174,61	317,76	143,15	-0,59	-0,96
F	383,40 b	139,46	36,38	112,44	657,62	545,18	0,57	-0,09
Mn	717,10 d	223,16	31,12	167,8	1033,39	865,59	-1,60	0,35
P	525,76 c	43,10	8,20	458,11	603,01	144,9	0,35	-0,93
Total	469,68	218,40	46,50	112,44	1033,39	920,95	2,89	-0,24

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Diferentes usos del suelo han originado diferencias significativas en la actividad de la deshidrogenasa en los primeros 10 cm de suelo. Tabla 15. De igual manera se detectan diferencias significativas entre distintas áreas de muestreo, lo cual podría estar asociado a las distintas épocas del año en que se realizaron los muestreos. La tendencia de los valores medios correspondientes a los distintos usos del suelo, es la misma en todas las áreas de muestreo, Figura 20. La interacción entre uso y área de muestreo no resultó significativa (Tabla 15).

Tabla 15. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre A_Uh, ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	3,2E+06	3	1,07E+06	72,55	0,000
B=Área de muestreo	3,2E+05	2	160280	10,86	0,000
Uso*Área de muestreo	1,5E+05	6	25626,4	1,74	0,121
Residuo	1,4E+06	96	14760		
Total (corregido)	5,1E+06	107			

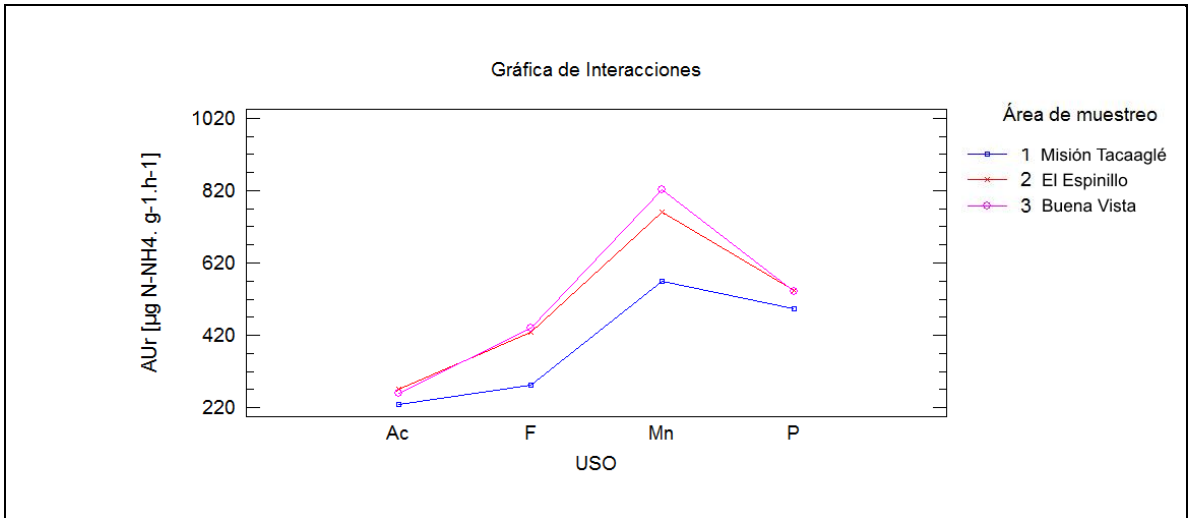


Figura 20. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la AUR.

La actividad de la ureasa presentó diferencias estadísticamente significativas entre todos los sistemas productivos evaluados, registrándose la mayor actividad enzimática en Mn y la menor en Ac (Figura 21), con una diferencia de 64,8 %.

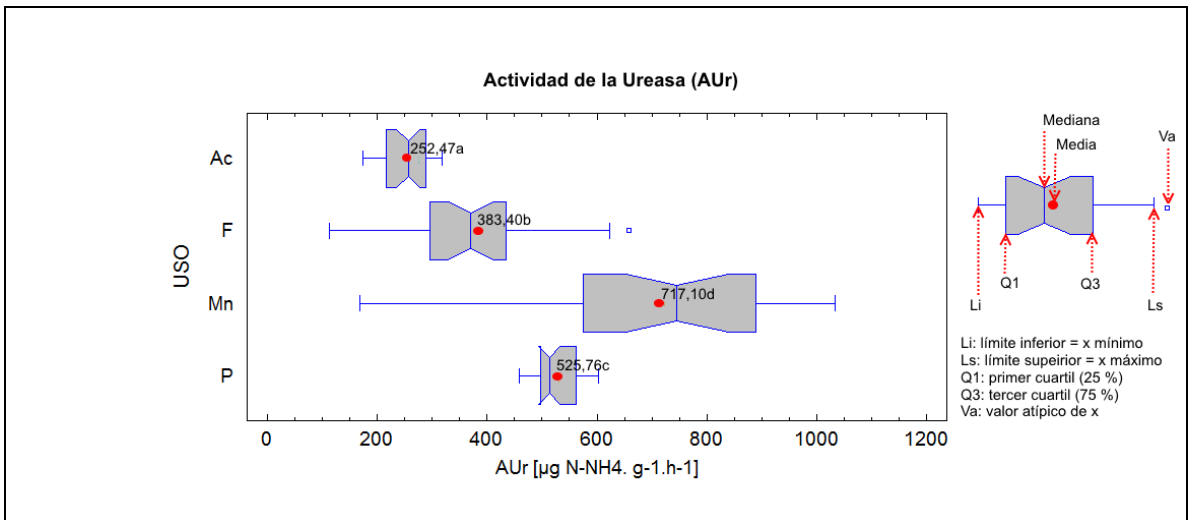


Figura 21. Actividad de la ureasa en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.3.g- Estabilidad estructural (EE)

La Tabla 16 presenta un resumen de los valores estadísticos de la estabilidad estructural, en distintos usos del suelo, evaluada a través del diámetro medio ponderado de los agregados luego de ser sometidos a la acción disgregante del agua. En la misma se observa una asimetría en la distribución de los valores para el uso F.

Tabla 16. Resumen estadístico de EE en función del uso del suelo.

USO	Promedio DMP (mm)	Desvío est.	C.V. (%)	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est
Ac	0,74 a	0,27	36,00	0,22	1,29	1,07	-0,27	0,31
F	1,05 b	0,34	32,43	0,58	1,88	1,3	2,20	0,41
Mn	1,97 c	0,41	20,93	1,14	2,71	1,57	-0,52	-0,47
P	2,22 c	0,75	34,00	1,15	3,15	2	-0,36	-1,90
Total	1,50	0,78	52,19	0,22	3,15	2,93	2,39	-1,61

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Diferentes usos del suelo han originado diferencias significativas en el DMP de los agregados en los primeros 10 cm de suelo. Tabla 17. De igual manera se detectan diferencias significativas entre distintas áreas de muestreo y la presencia de interacción entre uso del suelo y área de muestreo. En la Figura 22 se observa que en el área de muestreo 3 (Buena Vista) el uso P presenta agregados con un DMP menor al Mn testigo, no obstante continúan siendo superiores a la media de los usos F y Mn.

Tabla 17. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la estabilidad estructural, ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	41,08	3	13,69	83,03	0,000
B=Área de muestreo	2,87	2	1,43	8,69	0,000
Uso*Área de muestreo	5,38	6	0,90	5,44	0,000
Residuo	15,83	96	0,16		
Total (corregido)	65,16	107			

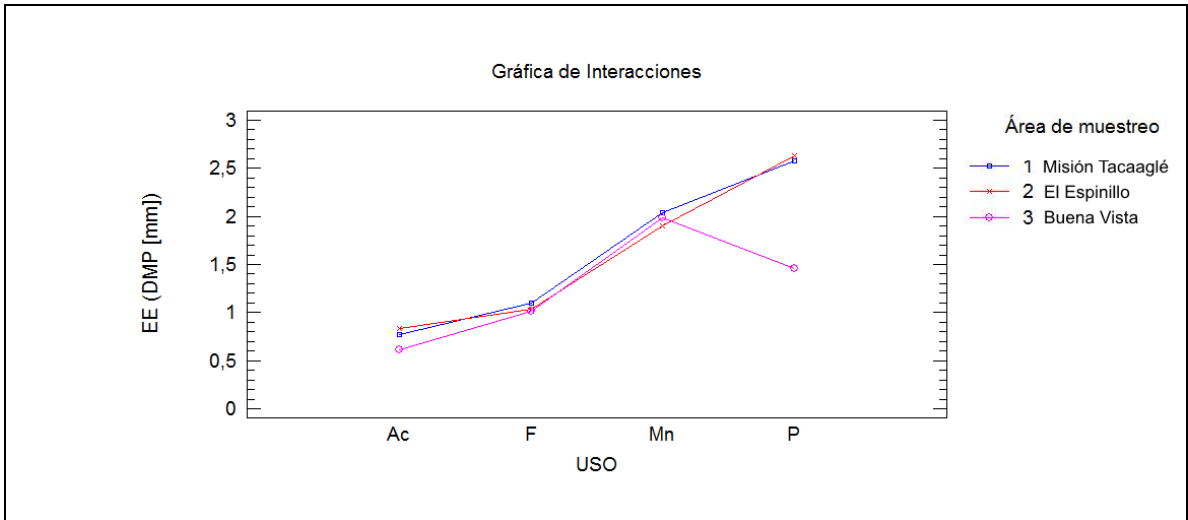


Figura 22. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la EE.

Existen diferencias significativas en los DMP correspondientes a los distintos usos del suelo (Figura 23). Los agregados más estables se encontraron en el uso P, con un amplio rango de datos, asociado en parte a los valores resultantes en el área de muestreo 3. Los agregados con menor DMP se corresponden con el uso Ac.

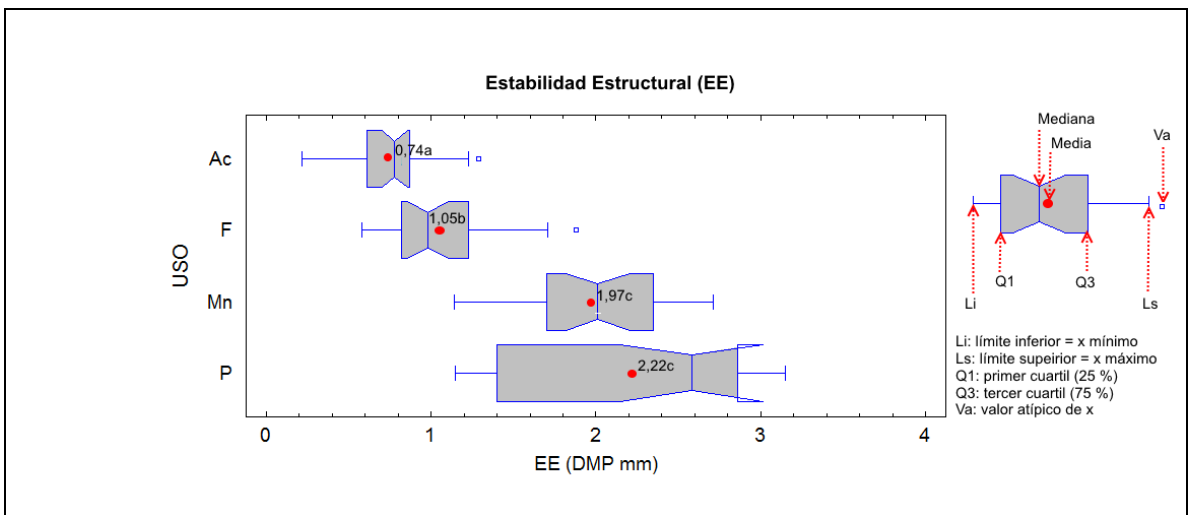


Figura 23. Estabilidad estructural en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.3.h- Conductividad hidráulica (CH)

Los datos correspondientes a la CH en los distintos usos presentan distribuciones normales, con excepción del uso F, en donde los valores de asimetría y curtosis obligarían a transformar los datos obtenidos, Tabla 18.

Tabla 18. Resumen estadístico de CH en función del uso del suelo.

USO	Promedio [cm.h-1]	Desvió est..	C.V. [%]	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	0,45 a	0,25	56,31	0,11	0,88	0,77	0,44	-1,50
F	0,38 a	0,36	95,33	0,11	1,83	1,72	6,41	10,83
Mn	1,18 b	0,44	37,50	0,45	2,5	2,05	1,89	1,55
P	1,58 c	0,73	46,26	0,52	3,32	2,8	1,48	0,35
Total	0,90	0,69	77,21	0,11	3,32	3,21	4,87	2,63

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

El uso del suelo originó diferencias estadísticas en la CH, Tabla 19; no así el área de muestreo. La interacción entre uso y área de muestreo no resultó estadísticamente significativa; en la Figura 24 se observa que la tendencia y los valores medios son similares en las tres áreas de muestreo.

Tabla 19. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la CH, ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A=Uso	27,31	3,00	9,10	3947,00	0
B=Área de muestreo	0,70	2,00	0,35	151,00	0,2253
Uso*Área de muestreo	1,22	6,00	0,20	88,00	0,5093
Residuo	22,14	96,00	0,23		
Total (corregido)	51,37	107,00			

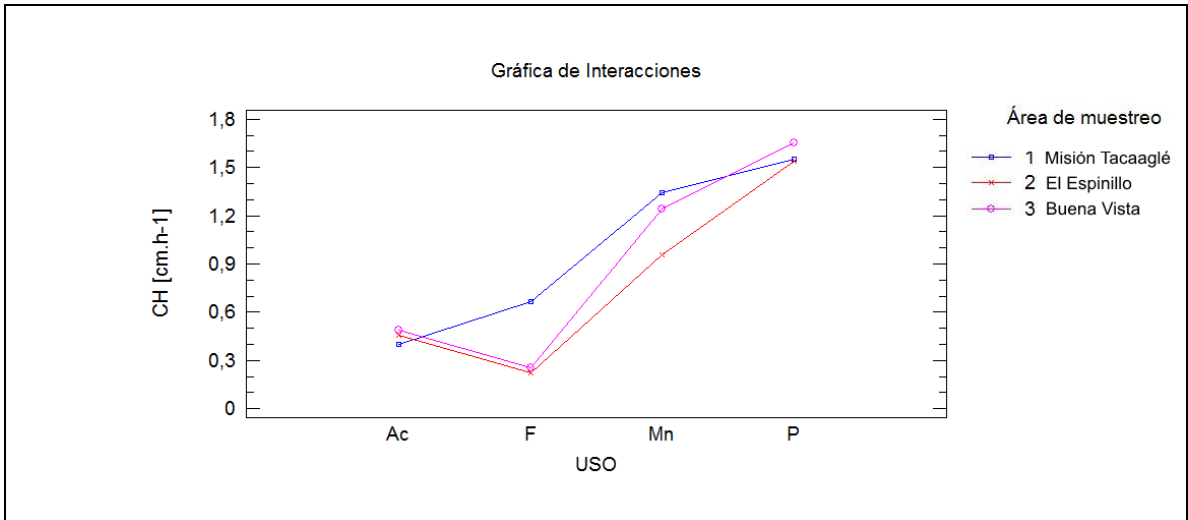


Figura 24. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la CH.

La mayor CH se registró en el uso P, 1,58 cm.h⁻¹, con diferencia estadística respecto a la del Mn testigo. A su vez, Ac y F, sin diferencias entre ellos, presentaron menor CH que este último, Figura 25. La amplitud, en el rango de valores de la CH para el uso P, estaría asociada a la amplitud observada anteriormente en los datos de EE para este sistema productivo. Así mismo participaría la interacción entre uso del suelo y área de muestreo, que en el área Buena vista, área 3, se traduce en valores de EE en el uso P, menores a los registrados en otras áreas para el mismo uso.

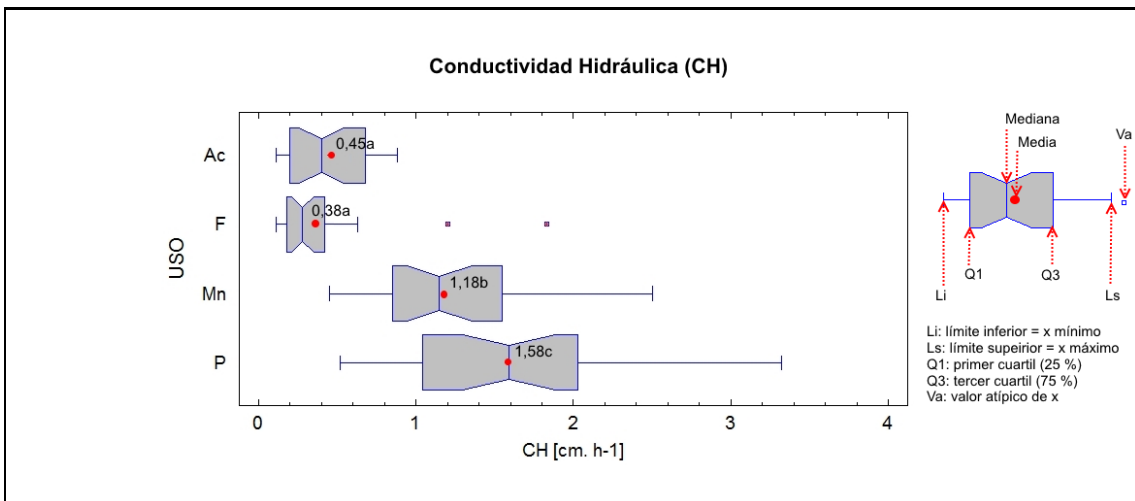


Figura 25. Conductividad Hidráulica en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

II.3.3.i- Potencial hidrógeno subsuperficial

Los valores de pH en muestras subsuperficiales (Tablas 20 y 21), presentan distribuciones normales, con excepción del uso F.

Tabla 20. pH de 20-40 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.

USO	Promedio	Desvió est.	C.V. [%]	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	7,04 b	0,39	5,56	6,5	7,9	1,40	1,65	0,21
F	7,71 c	0,71	9,17	5,5	8,48	2,98	-3,36	2,79
Mn	6,11 a	0,52	8,53	4,93	7,05	2,12	0,04	-0,44
P	7,64 c	0,35	4,65	6,7	8,38	1,68	-0,22	1,52
Total	7,13	0,82	11,50	4,93	8,48	3,55	-1,95	-1,14

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Tabla 21. pH de 40-60 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.

USO	Promedio	Desvió est.	C.V. [%]	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	7,40 b	0,69	9,29	6,4	8,3	1,9	-0,28	-1,83
F	8,08 c	0,43	5,35	6,7	8,47	1,77	-5,09	6,20
Mn	6,64 a	0,65	9,72	5,5	8,36	2,86	0,40	0,70
P	8,01 c	0,30	3,72	7,5	8,5	1	0,13	-1,41
Total	7,53	0,79	10,49	5,5	8,5	3	-3,21	-1,07

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

El uso del suelo ha tenido un efecto significativo sobre la reacción del suelo subsuperficial a las profundidades evaluadas, no registrando un efecto estadístico el área de muestreo, ni existiendo interacciones entre uso y área de muestreo, Tablas 22 y 23. La variación de los valores medios de pH en los distintos usos sigue una misma tendencia en las tres áreas de muestreo, Figuras 26 y 27.

Tabla 22. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (20-40 cm), ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A=Uso	44,54	3	14,85	55,94	0,000
B=Área de muestreo	0,91	2	0,46	1,72	0,184
Uso*Área de muestreo	0,93	6	0,15	0,58	0,743
Residuo	25,48	96	0,26		
Total (corregido)	71,86	107			

Tabla 23. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (40-60 cm), ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A=Uso	36,50	3	12,17	44,68	0,000
B=Área de muestreo	2,27	2	1,14	4,18	0,018
Uso*Área de muestreo	1,87	6	0,31	1,15	0,342
Residuo	26,14	96	0,27		
Total (corregido)	66,79	107			

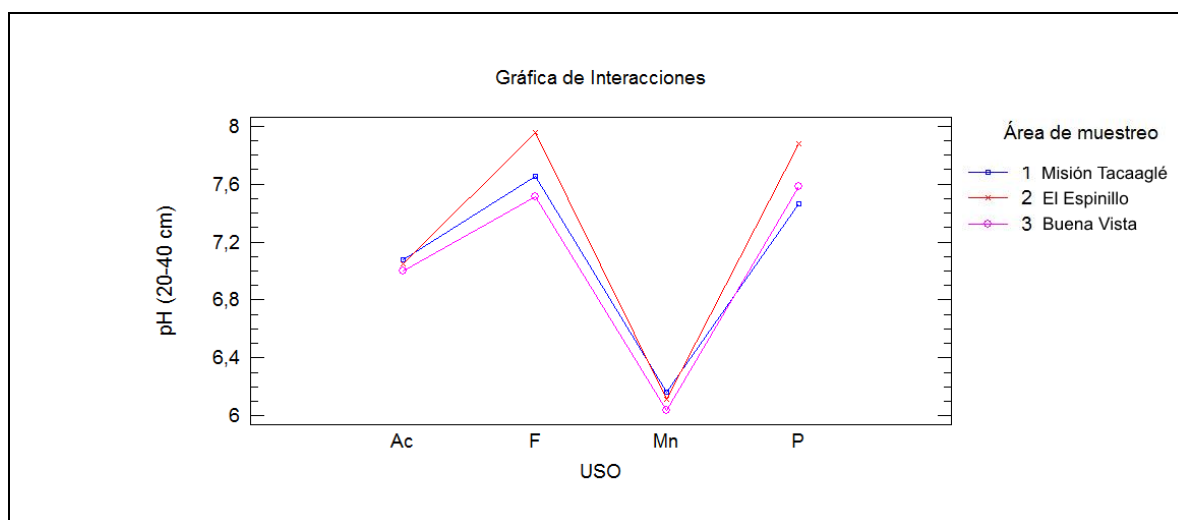


Figura 26. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (20-40 cm).

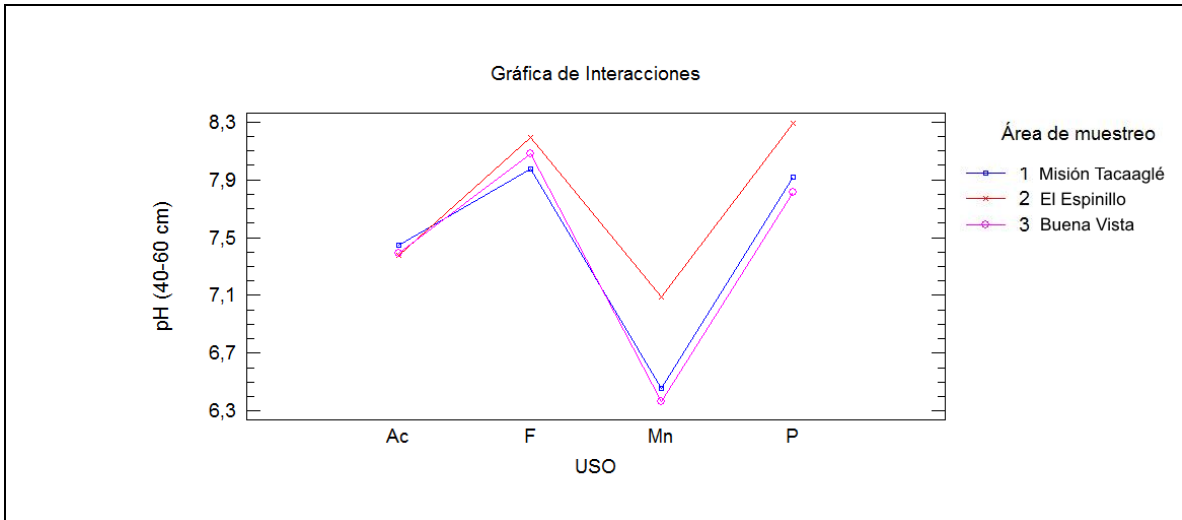


Figura 27. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre el pH (40-60 cm).

Los valores medios de pH, de 20 a 40 cm, en función del uso del suelo se presentan en la Figura 28; en ésta se observa un valor ligeramente ácido para la situación de Mn, con un rango de variación de ácido a neutro. Los distintos usos han producido diferencias significativas en la reacción del suelo, con pH mayores a la situación testigo: valor medio neutro para Ac y ligeramente alcalino para F y P. De 40 a 60 cm de profundidad, Figura 29, estas diferencias se han mantenido, elevándose en todos los casos los valores de pH y llegando a registrarse algunos valores alcalinos.

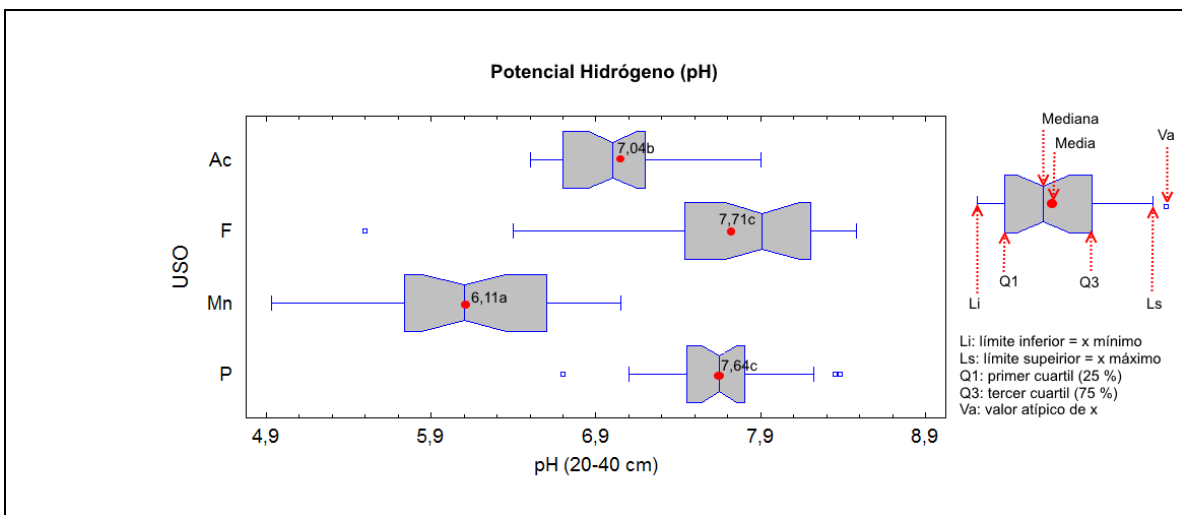


Figura 28. pH (20-40 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

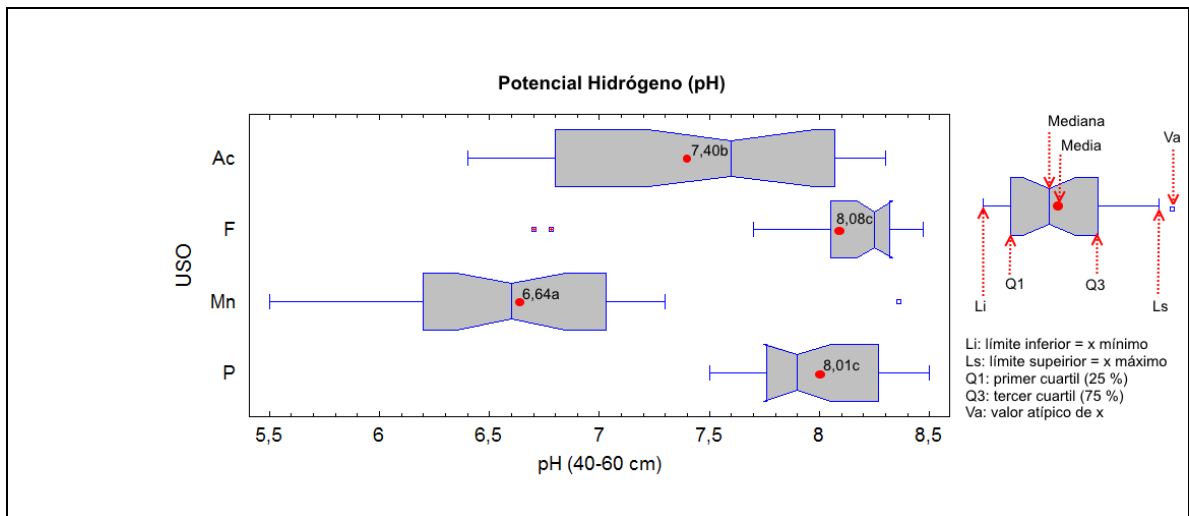


Figura 29. pH (40-60 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas.

II.3.3. j- Conductividad eléctrica subsuperficial

El resumen estadístico de la conductividad eléctrica correspondiente a muestras subsuperficiales se presenta en las Tablas 24 y 25. En ellas se destaca que la CE de 20 a 40 cm y de 40 a 60 cm, en el uso testigo, Mn, se aparta de una distribución normal por su asimetría. Así también presenta un desvío estándar que supera una relación 3/1 con el registrado en otros usos, lo que compromete la homogeneidad de la varianza.

En el uso F, de 20 a 40 cm de profundidad, los valores de CE presentan un sesgo estandarizado (asimetría) que aparta a la distribución de un modelo normal.

Tabla 24. CE de 20-40 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.

USO	Promedio [dS.m ⁻¹]	Desvío est.	C.V. [%]	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	0,86 a	0,42	49,33	0,1	1,5	1,4	-0,87	-1,08
F	2,32 b	1,29	55,67	0,72	5,31	4,59	2,29	0,18
Mn	2,20 b	2,43	110,66	0,15	9,25	9,1	3,10	1,63
P	2,73 b	1,33	48,63	0,04	4,6	4,56	-0,74	-1,00
Total	2,03	1,68	82,74	0,04	9,25	9,21	6,06	5,55

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

Tabla 25. CE de 40-60 cm en función del uso del suelo. Resumen estadístico.

USO	Promedio [dS.m ⁻¹]	Desvío est.	C.V. [%]	Mínimo	Máximo	Rango	Sesgo est.	Curtosis est.
Ac	0,74 a	0,50	67,42	0,1	1,75	1,65	0,99	-0,42
F	2,89 b	1,41	48,93	1,06	5,96	4,9	1,74	-0,22
Mn	2,45 b	3,92	159,88	0,2	14,26	14,06	4,48	3,74
P	2,91 b	1,27	43,66	0,76	5	4,24	-0,12	-1,30
Total	2,25	2,34	104,16	0,1	14,26	14,16	10,85	19,53

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

C.V.=coeficiente de variación; est.=estándar. Letras distintas señalan diferencias significativas. (p=0,01).

El uso del suelo ha tenido un efecto significativo sobre la CE subsuperficial, Tablas 26 y 27. En las mismas queda de manifiesto que el área de muestreo no ha producido un efecto estadístico, no obstante existe una interacción entre uso del suelo y área de muestreo que se evidencia en las Tablas y se observa claramente en las Figuras 30 y 31. En el área de muestreo Espinillo (área 2) la CE en los usos Mn y P no sigue la misma tendencia que en las restantes áreas.

Tabla 26. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (20-40 cm), ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A=Uso	53,08	3	17,69	10,49	0,000
B=Área de muestreo	0,23	2	0,12	0,07	0,933
Uso*Área de muestreo	85,19	6	14,20	8,41	0,000
Residuo	161,97	96	1,69		
Total (corregido)	300,47	107			

Tabla 27. Efecto del uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (40-60 cm), ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A=Uso	85,81	3	28,60	9,58	0,000
B=Área de muestreo	18,68	2	9,34	3,13	0,048
Uso*Área de muestreo	194,90	6	32,48	10,88	0,000
Residuo	286,59	96	2,98		
Total (corregido)	585,98	107			

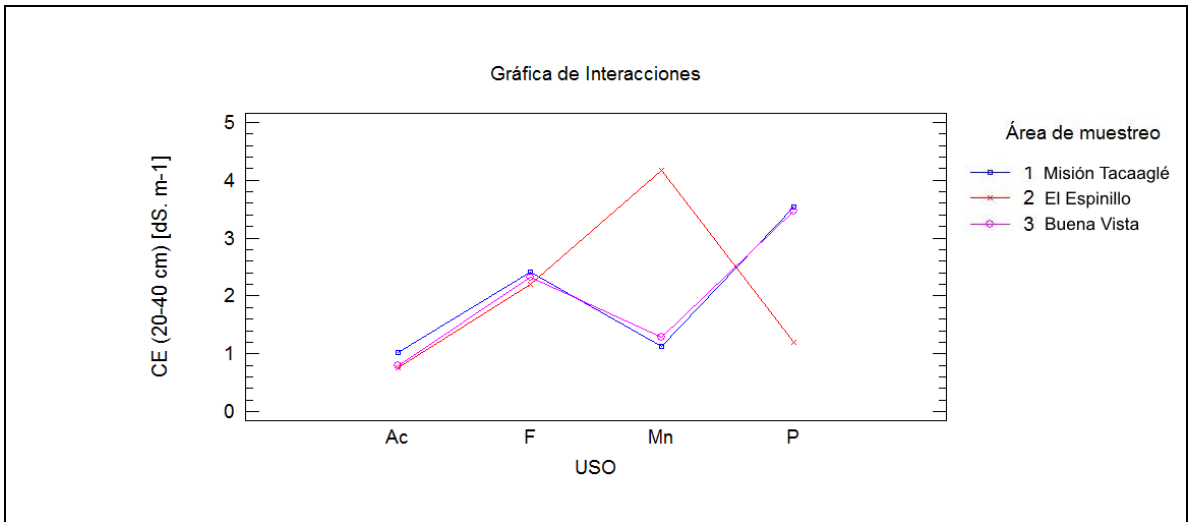


Figura 30. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (20-40 cm).

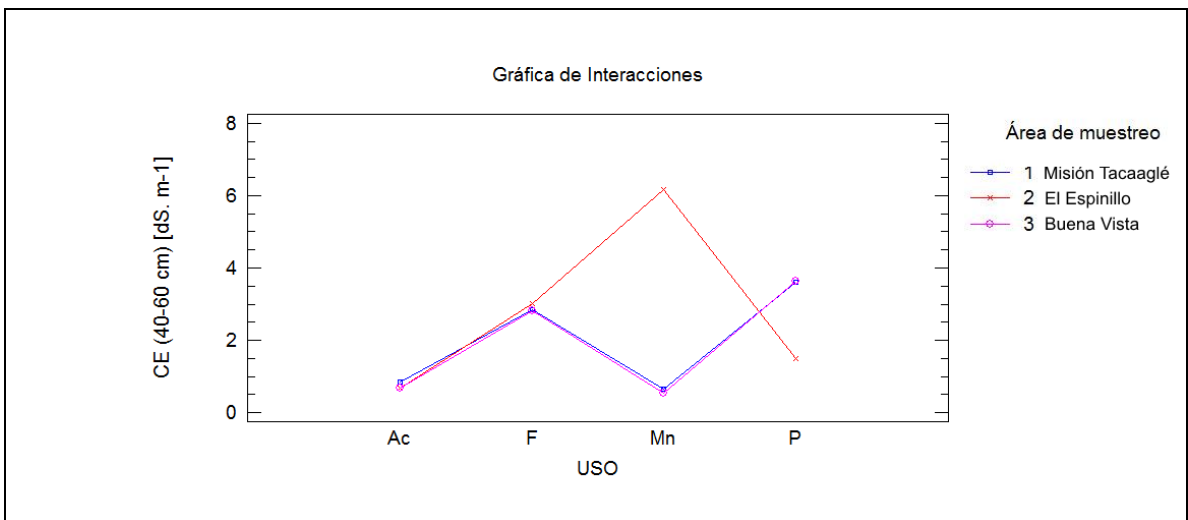


Figura 31. Interacciones de uso del suelo y área de muestreo sobre la CE (20-40 cm).

Como se mencionó anteriormente el uso del suelo ha producido diferencias significativas en la CE subsuperficial. De 20 a 40 cm de profundidad el uso Ac presentó un valor medio de $0,86 \text{ dS.m}^{-1}$, que resulta estadísticamente diferente, e inferior al contenido salino de los restantes usos, los cuales no difieren entre sí, Figura 32. Debe señalarse que la dispersión de valores en el uso Mn, la presencia de valores fuera de los intervalos de confianza y la separación que se observa entre la media y la mediana, son consecuencia de los datos correspondientes al área de muestreo Espinillo.

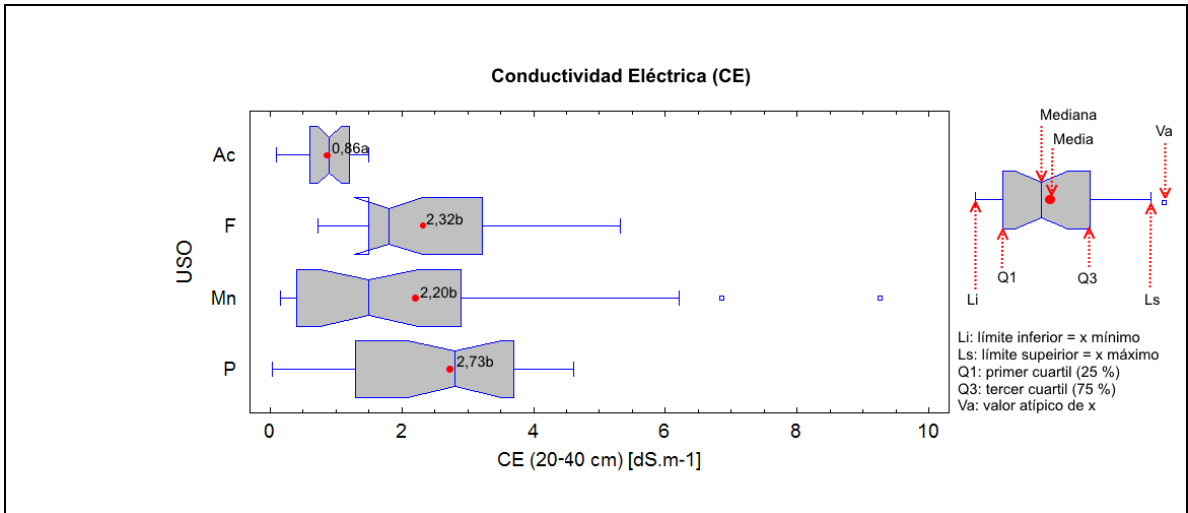


Figura 32. CE (20-40 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

La Figura 33 permite observar un comportamiento similar en el contenido salino de 40 a 60 cm de profundidad, con un incremento en todos los casos excepto en Ac donde se registró un valor medio ligeramente inferior, $0,74 \text{ dS.m}^{-1}$. El uso Ac, al igual que en las muestras de 20 a 40 cm, fue el único en diferenciarse estadísticamente de Mn, en donde la dispersión de valores resultó aún mayor que en las muestras superiores.

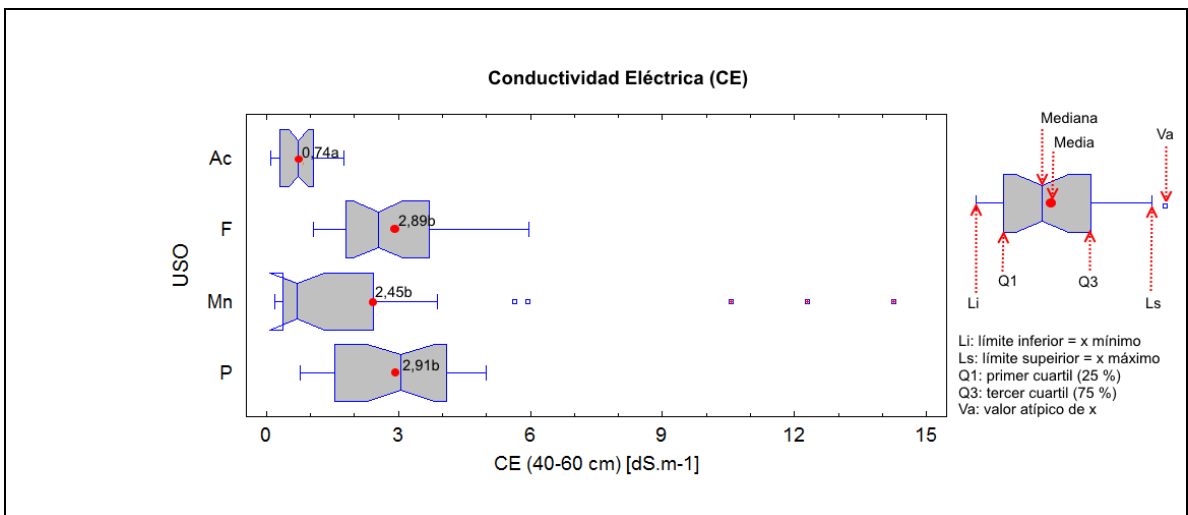


Figura 33. CE (40-60 cm) en función del uso. Comparación de medias y medianas.

Letras distintas señalan diferencias significativas. ($p=0,01$).

II.3.4- Comparación del efecto edáfico de los distintos los SPR

Como se ha visto hasta ahora, doce de las variables evaluadas han presentado diferencias estadísticas en sus valores medios. La Tabla 28 reúne a estas diferencias permitiendo observar que sólo el uso pastoril resultó superador en algunos de los parámetros analizados: COt, Nt, Res, EE y CH. El sistema pastoril ha incrementado los valores de carbono orgánico total y nitrógeno total, acompañados de un incremento en la actividad biológica medida a través de la respiración edáfica. En forma colateral, desde el punto de vista estadístico, se ha mantenido la estabilidad de la estructura con respecto al Mn y aumentado la conductividad hidráulica. Las fracciones más lábiles del carbono, representadas por el carbono particulado, y la actividad enzimática resultó superior en el testigo Mn. Este último sistema presentó pH subsuperficiales ligeramente ácidos, mientras que todos los usos produjeron su incremento. Sólo la situación de Ac se asocia a una disminución en el contenido de sales subsuperficiales.

Tabla 28. Resumen del comportamiento de las variables en los distintos usos del suelo

	COt	COp	Nt	Res	ADh	AUr	EE	CH	pH 20-40	pH 40-60	CE 20-40	CE 40-60
Mn	b	d	b	a	c	d	c	b	a	a	b	b
P	c	c	c	c	b	c	c	c	c	c	b	b
F	a	b	a	a	a	b	b	a	c	c	b	b
Ac	a	a	a	b	a	a	a	a	b	b	a	a

Ac, agricultura continua; F, fruticultura; Mn, monte nativo; P, pradera.

Letras distintas señalan diferencias significativas. Los valores aumentan en orden alfabético. Se resaltan los mejores valores desde un punto de vista agronómico.

II.4- Discusión

Las diferencias obtenidas en los valores de pHs y CEs, en los distintos usos resultaron escasas, no significativas para CEs. En el caso de pHs la diferencia de valores fue significativa desde lo estadístico, entre Mn-F y Mn-P, con un pequeño incremento en pH superficial (6,32 a 6,35) y sin diferencias entre Mn-Ac. Estos resultados, sumados a los registrados por otros investigadores, en cuanto a cambios de escasa magnitud en uno u otro sentido, hicieron que no se profundizase en el análisis de estas variables.

Sanzano *et al.* (2005) encontraron, en Haplustoles de Tucumán, luego de 20 años de desmonte y distinto uso agrícola, ligeras acidificaciones de escasa significancia agronómica. Cosentino *et al.* (2007), en Argiudoles Vérticos de Entre Ríos, registraron

también escasas variaciones en pH y CE. Luego de 40 años de agricultura desde el desmonte informaron un incremento de pH de 6,1 a 6,3. Heredia *et al.* (2006) trabajando con Argiudoles del norte de Santa Fe, provenientes de un pastizal natural (aibal) reportaron, luego de 20 años de agricultura, una disminución de mayor magnitud en el pH superficial (6,6 a 5,6) y la ausencia de variaciones estadísticas en la CE.

II.4.1- Contenido de COt.

Urricarriet y Lavado (1999); Casermeiro *et al.* (2001); Heredia *et al.* (2004); Oluwatosin *et al.* (2006); Cantú *et al.* (2007); Piccolo *et al.* (2008); Ferreras *et al.* (2009); Moges *et al.* (2013); entre otros, han evaluado al contenido de carbono orgánico como indicador en distintos suelos y regiones. En el caso de estudio, de forma análoga a estos trabajos, la realización continua de labranzas convencionales en el uso Ac ha favorecido la mineralización de la materia orgánica, lo cual justificaría la disminución de 30,75 % en el contenido de COt con respecto al Mn. Esta pérdida resulta algo inferior a la informada por Moges *et al.*, (2013), para suelos subtropicales de Etiopia y similar a la informada por Urricarriet y Lavado (1999) y Ferreras *et al.* (2009) en Argiudoles Típicos de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba, sin Mn originales y con 20 a 30 años de agricultura continua y labranza convencional. Veinte años de uso frutícola, con menores laboreos en el suelo, generalmente limitados a la preparación previa a la implantación y el control de maleza mediante rastra de discos entre filas, durante los primeros años, habrían originado la disminución de 17,36 % del COt presente en Mn. La misma se asociaría a un incremento en la mineralización debida al laboreo durante los primeros años de pre y post implantación y posteriormente a un menor aporte de residuos orgánicos. El incremento de 24,72 % en COt en el uso P con respecto a Mn, ha sido el resultado del aumento en la cantidad de materia orgánica que anualmente, y durante 25 años, las praderas han incorporado a través de la biomasa de raíces al suelo. Esta biomasa así incorporada tiene una mayor oportunidad de seguir la vía de humificación.

II.4.2- Contenido de Carbono orgánico particulado (COp)

Ferreras *et al.* (2009) y de Figueiredo *et al.* (2010), coinciden en señalar a la fracción particulada del CO como aquella donde se producen los mayores cambios ante diferentes manejos. En tal sentido resulta coherente que todos los SPR considerados mostrasen contenidos de COp significativamente menores que el del Mn. En el caso

particular de agricultura continua, la disminución resultó de mayor rango que la informada por Ferreras *et al.* (2009); en Argiudoles pampeanos.

El SPR Pastura, presentó un incremento significativo en COt con respecto a la situación testigo y una disminución de COp, aun cuando su contenido fue superior a los otros SPR evaluados (Tabla 3). Esto podría tener su justificación en que la acumulación o no de formas “jóvenes” de carbono orgánico, asociada a distintos manejos, depende principalmente de las diferencias en la acumulación de formas lábiles parcialmente descompuestas de materia orgánica y en las tasas de descomposición (Janzen *et al.*, 1998). Según este autor, niveles altos de carbono joven pueden reflejar la supresión de tasas de descomposición. En base a la Res., se puede afirmar que la actividad biológica en Mn y F, sin diferencias significativas entre ellos, fueron menores a la de otros SPR con la consecuente menor tasa de descomposición.

II.4.3- Contenido de Nitrógeno total (Nt)

El incremento en el contenido de Nt para el uso P (30,64 %) se justifica a través del aumento en la cantidad de materia orgánica que anualmente las praderas incorporan a través de la biomasa. El elevado contenido de Nt en Mn (2,35 g.Kg⁻¹) es coincidente con el comportamiento del Nt bajo vegetación de monte y fachinal, aún en condiciones de menor humedad, reportado por Albanesi *et al.* (2001) en Argiustoles y Haplustoles del chaco semiárido. La disminución en situaciones de Ac y F según estos autores se asociaría a la mineralización gradual asociada a las labranzas convencionales y a la eliminación de costras microbianas superficiales integradas por criptógamas, cianobacterias, líquenes y hongos microscópicos, presentes en los primeros centímetros del suelo de monte que constituyen una fuente dinámica de nitrógeno en la región chaqueña.

II.4.4- Respiración edáfica (Res).

Las tasas de respiración obtenidas resultaron dentro de los rangos reportados por Ferreras *et al.* (2009) para Argiudoles con vegetación natural, en distinta situación climática.; sin embargo en manejos agrícolas, frutícolas y pastoriles, la respiración siempre resultó superior en nuestro caso que en los de pradera pampeana, informados por los mismos.

II.4.5- Actividad enzimática: deshidrogenasa (ADh) y ureasa (AUr).

Actualmente está ampliamente aceptado que un buen nivel de actividad microbiana es esencial para el mantenimiento de la calidad del suelo (Bástida *et al.*, 2006; Trasar Cepeda *et al.*, 2008); como así mismo que los microorganismos constituyen la fuente principal de enzimas edáficas. Algunas enzimas del grupo de las oxidoreductasas, como la deshidrogenasa, se encuentran principalmente en la membrana plasmática de bacterias y membranas mitocondriales de algunos hongos. Estas, reflejan la capacidad oxidativa total de la masa microbiana viable, pudiendo representar el tamaño y actividad de la misma. Otras como la ureasa, del grupo de las hidrolasas, son sintetizadas y secretadas extracelularmente por bacterias y hongos, pasando a formar parte de la matriz del suelo (Tripathi *et al.*, 2007). La actividad de la ureasa puede entonces estar regulada por la producción y secreción de microorganismos (Aon *et al.*, 2001) o a través de condiciones físico químicas que incidan en la unión de la enzima a los coloides del suelo (Sinsabaugh, 1994).

Las actividades enzimáticas evaluadas se corresponden con una enzima del grupo de las oxidoreductasas, la deshidrogenasa, y una del grupo de las hidrolasas, la ureasa. Estas, a pesar de encontrarse en concentraciones relativamente bajas, cumplen un rol fundamental en la dinámica de nutrientes, en especial aquellos ligados al ciclo de la materia orgánica (Bolinder *et al.*, 1999). Los valores encontrados de ADh resultaron en general, similares a los reportados para Argiudoles y Hapludoles de otras regiones (Ferrerías *et al.*, 2009) para todos los usos, a excepción del valor medio para Mn ($26,04 \mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$) que resultó superior a lo informado.

Los valores medios de AUr, fueron más elevados que datos informados por Albanesi *et al.*, 2001; para la región chaqueña. No obstante, Dkhar *et al.* (2012) trabajando en suelos bajo vegetación de bosque prístino, en la India, a una latitud similar a la de estudio, reportaron valores de AUr de más de $500 \mu\text{g N-NH}_4\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. La mayor actividad enzimática en situaciones de suelos prístinos o bajo pasturas resulta coincidente con el trabajo de Acosta Martínez *et al.* (2007). Ferrerías *et al.* (2009) en la mayor parte de sus resultados, confirmaron este comportamiento y señalaron a la actividad enzimática, entre otros parámetros capaces de identificar cambios en la calidad del suelo en el corto plazo. En forma coincidente García Orenes *et al.* (2010) demostraron en ensayos de un año, con distintos manejos agrícolas, la sensibilidad de estas variables,

II.4.6- Estabilidad estructural (EE).

La sensibilidad de la estabilidad estructural, frente a distintos usos y manejos en Argiudoles de otras regiones, ha sido verificada (Urricariet y Lavado,1999: Cerdà, 2000; Ferreras *et al.*,2007; Álvarez *et al.*,2008). Al igual que en estos casos, en el área de subtropical norte de Formosa, la misma resultó ser una variable sensible al uso del suelo. Evaluada a través de los cambios en el DMP de los agregados, señaló que la mayor estabilidad correspondía al uso P con agregados de un DMP=2,22 mm, sin diferencias significativas con respecto al Mn, con DMP=1,97 mm. Álvarez *et al.* (*op. cit.*) en Argiudoles del sudeste de provincia de Buenos Aires, encontraron que la mayor EE de agregados se presentaba en suelos no laboreados e incluso forestados con especies exóticas durante más de 30 años. Los primeros 10 cm de suelo, luego de 25 años de Ac disminuyeron el DMP de sus agregados un 62,4 %, asociado a una disminución de 30,75 % en el contenido de COt y 72,35 % de COp. Veinte años de F provocaron una disminución de 46,7 % en el DMP. En situaciones climáticas menos exigentes (pampa ondulada), la disminución del DMP de los agregados resistentes al agua ha sido reportada como uno de los indicadores más sensibles del deterioro de Argiudoles Típicos con 30 años de agricultura (Urricariet y Lavado, *op. cit.*), conjuntamente con una disminución de un 23 % en el contenido de COt.

II.4.7- Conductividad hidráulica (CH).

La implantación de praderas en los suelos evaluados ha producido luego de 25 años un incremento con significancia estadística en la CH superficial con respecto a la del Mn. Contrariamente los usos F y Ac han disminuido su CH, sin presentar diferencias entre ellos.

La medición sobre muestras disturbadas contempla la porosidad resultante de agregados y partículas menores a 2mm y ha sido utilizada por otros autores como Iruetia y Peinemann (1986), Luque y Peinemann (1995). La utilización del método de laboratorio se apoyó en distintas razones:

- Los diámetros medios ponderados de los agregados resistentes al agua fueron, en los suelos y condiciones evaluadas, superiores al tamiz de 2mm sólo en el uso P, DMP=2,22mm.
- Los agentes estructurantes orgánicos, asociados a agregados de mayor tamaño, serían de carácter transitorio (mayormente polisacáridos) y temporarios (raíces e hifas de hongos) (Tisdall y Oades, 1982).

- La medición en laboratorio resulta más sencilla y de menor costo operativo que las determinaciones de campo.

Ramírez Pisco *et al.* (2006), evaluando los efectos de siembra directa y siembra convencional en propiedades físicas de Argiudoles de texturas franco limosas, en laboratorio, sobre cilindros con muestras de suelo, encontraron valores de CH (K)=2,36 cm.h⁻¹, algo superiores al caso de estudio. Para estos autores la CH y la inestabilidad de los agregados fueron los parámetros físicos más sensibles a las diferencias entre siembra directa y siembra convencional a largo plazo.

II.4.8- pH y contenido salino subsuperficial.

Los pH subsuperficiales, 20-40 cm y 40-60 cm, siguieron una misma tendencia. Los valores inferiores, se registraron en la situación testigo de Mn con pH ligeramente ácido; el uso Ac produjo un incremento significativo desde lo estadístico con valores de pH neutro (7,04) y ligeramente alcalino (7,40). Los sistemas productivos P y F, sin diferencias estadísticas entre ellos, presentaron la mayores valores de pH, ligeramente alcalinos de 20-40 cm y moderadamente alcalinos de 40-60 cm.

El contenido salino de muestras subsuperficiales, evaluado mediante la CE del extracto de saturación, solo mostró diferencias significativas en el uso Ac, resultando una CE inferior que en los restantes sistemas productivos.

II.4.9- El efecto edáfico de los distintos SPR.

Desde un punto de vista edáfico-ambiental, el SPR monte nativo representa la situación testigo de un equilibrio entre suelo- clima- vegetación. Se debe considerar que los procesos productivos que incrementan el flujo energético desde el ambiente hacia el producto, en relación a sistema natural, elevan el estatus energético, aceleran procesos y atentan contra la sustentabilidad del sistema. Sobre esta base todos los sistemas productivos contrastados vulnerarían la sustentabilidad ambiental.

Cruz Ruiz *et al.* (2012), Ferreras *et al.* (2009), Cosentino *et al.* (2007) han verificado la disminución del CO luego de desmonte y distintos períodos de agricultura. Las labranzas y la consecuente ruptura de los agregados del suelo, ocasionan que el C y el N de fácil mineralización, localizados en reservas físicamente protegidas, sean accesibles a la degradación microbiana (Kristensen *et al.*, 2000). Así también la disminución de la materia orgánica que se incorpora al suelo (Lal, 2000) y un aumento en la mineralización de CO debido a la utilización de fertilizantes y biocidas (Cruz Ruiz *et*

al., 2012), constituyen algunas de las causas que justifican el deterioro de las propiedades edáficas en el sistema de agricultura continua analizado.

El efecto de las pasturas para atenuar y revertir al menos parcialmente la degradación edáfica que produce la agricultura, ha sido probado en distintos suelos y regiones. Así Studdert *et al.* (1997) concluyeron que para Argiudoles de provincia de Buenos Aires, rotaciones de 7 años de cultivos convencionales, alternados con 3 años de pasturas, mantendrían a las propiedades del suelo dentro de límites aceptables para un manejo sustentable. De manera similar el resultado positivo de pasturas permitió, en 5 años, revertir parcialmente el proceso de degradación originado por 20 años de agricultura en Andisoles y Entisoles desmontados (Cruz-Ruiz *et al.*, 2012). Las pasturas, en general, representan un mayor aporte de materia orgánica, en profundidad y en forma anual que el monte nativo. Consecuentemente propiedades como la estabilidad de los agregados y la conductividad hidráulica se ven beneficiadas.

EL SPR frutícola tiene un efecto, en general, degradativo sobre las propiedades edáfica consideradas. Esto se debe tal vez a menor aporte de biomasa que el Mn, en parte debido al manejo que comúnmente se realiza en cuanto a la cobertura herbácea, la cual o bien se elimina total o parcialmente en los montes de banana y en menor instancia en los de pomelo.

II.5-Conclusiones

La mayoría de las variables edáficas evaluadas presentaron modificaciones en sus valores característicos, luego de 20 a 25 años de distintos usos del suelo. Las excepciones resultaron: la reacción del horizonte superficial del suelo y su contenido salino.

De los tres usos del suelo, comparados con el monte nativo, el uso pastoril resultó el más compatible con un sistema productivo sustentable desde el punto de vista edáfico. En sistemas productivos agrícolas y frutícolas deberían incluirse esquemas de rotación y coberturas de pradera respectivamente.

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELOS

III.1- Introducción

Existen varias definiciones de “indicadores”, adoptando una de las mencionadas anteriormente como ejemplo, podríamos decir que: un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante, haciendo que una condición de interés se haga perceptible. Cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible dicha información (Cantú *et al.*, 2007). Para autores como Batista Cruz *et al.* (2004), Giuffré *et al.* (2006, 2008) estas condiciones de interés representan cambios en las funciones edáficas, los cuales deben ser cuantificados mediante la medición de las propiedades que mejor los caracterizan. Los indicadores de calidad del suelo constituyen una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local, regional y global, y su estudio debe hacerse en forma particular, según las condiciones de cada agroecosistema, García *et al.* (2012)

En el capítulo anterior se presentaron los resultados de la evaluación de una serie de propiedades edáficas: físicas, químicas y biológicas, frente a distintos usos del suelo; con el objetivo de definir si las mismas fueron sensibles a distintos sistemas productivos durante el periodo de tiempo considerado.

Los parámetros medidos han sido evaluados como indicadores de calidad en distintos suelos y regiones: Eiza *et al.* (2005), Ferreras *et al.* (2007), Álvarez *et al.* (2008), Ferreras *et al.* (2009), Campitelli *et al.* (2010), Benintende *et al.* (2012), Khaledian *et al.* (2013), entre otros.

Eiza *et al.* (2005), determinaron la sensibilidad del COt y el COp a fin de incluirlos como indicadores del efecto de distintos sistemas de cultivos. Ferreras *et al.* (2007) analizaron COt y EE, en Argiudoles y Hapludoles de la región pampeana norte, Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba. De forma similar Ferreras *et al.* (2009), postularon a la fracción particulada del carbono orgánico como indicador de calidad de suelos. Campitelli *et al.* (2010) señalaron al CO y sus fracciones, al Nt y al cambio de diámetro medio ponderado de los agregados, entre los indicadores más sensibles y sencillos de medir en Haplustoles del centro de Córdoba. Álvarez *et al.* 2008 investigaron el rol de la EE, morfología y rugosidad de los agregados como indicadores de calidad en Argiudoles Típicos de provincia de Buenos Aires. Rodríguez *et al.* (2009) a la CH saturada, entre otros parámetros.

La evaluación y/o utilización de variables biológicas como posibles indicadores data de más de quince años: Karlen *et al.* (1997) utilizaron respiración, carbono y nitrógeno de biomasa microbiana entre otras; más recientemente se han incorporado como posibles indicadores variables bioquímicas como por ejemplo la actividad de distintas enzimas: Ferreras *et al.* (2009), Dkhar *et al.* (2012).

Ferreras *et al.* (2009), trabajaron con actividad enzimática (ureasa, deshidrogenasa y fosfatasa ácida). Benintende *et al.* (2012) caracterizaron indicadores biológicos y bioquímicos en Molisoles, Alfisoles y Vertisoles de Entre Ríos, entre ellos respiración.

Doce de los catorce parámetros medidos en el presente estudio mostraron cambios significativos. Sobre la base de esas variables resulta necesario determinar el peso de cada una en relación a la variabilidad total del sistema edáfico estudiado.

En tal sentido, los objetivos del presente capítulo fueron:

- Identificar indicadores de calidad para Argiudoles y Hapludoles subtropicales
- Comprobar si dentro del conjunto de indicadores identificados, aquellos asociados a la Materia Orgánica resultan las de mayor peso.

III.2- Materiales y métodos

Las variables que presentaron diferencias estadísticas en sus valores medios, para cada uso del suelo, fueron analizadas en forma multivariada. Mediante Análisis de Componentes Principales (ACP) se determinó el peso relativo de las variables, en relación a la varianza total de la muestra (Johnson, 1998). Se realizó un análisis de correlaciones para variables preseleccionadas como indicadores,

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete informático Statgraphics Centurión®.

III.3- Resultados

III.3.1- Detección de posibles indicadores y peso de los mismos.

La individualización de doce variables con diferencias significativas en sus valores medios, frente a los distintos usos del suelo constituyó el paso inicial en la identificación de indicadores. La evaluación conjunta de estas variables, mediante un análisis de componentes principales (ACP), determinó que las tres primeras

componentes, con un autovalor superior a 1, explicaron casi el 68 % de la varianza total de la muestra, Tabla 29.

**Tabla 29. Varianza explicada por las distintas componentes.
Análisis de Componentes Principales.**

Componente número	Autovalor	Varianza [%]	Varianza acumulada [%]
1	3,69	30,7	30,7
2	2,63	21,9	52,7
3	1,82	15,1	67,8
4	0,83	7,0	74,8
5	0,68	5,6	80,4
6	0,56	4,6	85,0
7	0,51	4,3	89,3
8	0,43	3,6	92,8
9	0,31	2,6	95,4
10	0,24	2,0	97,4
11	0,19	1,6	99,0
12	0,12	1,0	100,0

La matriz original de datos, de la cual parte el ACP, representa la variabilidad del sistema y pretende reflejar aquellos cambios producidos en 25 años de diferentes manejos del suelo. El ACP busca reducir la información a partir de la combinación lineal de los parámetros originales, crear nuevas variables, ahora independientes, y detectar a las variables originales, con mayor peso en la primera componente. El peso y el sentido con que cada variable interviene en la componente principal están dados por el signo y valor del coeficiente con que participa en la misma. El análisis gráfico de la Figura 34 permite observar que COt, COp, Nt, ADh, AUr, EE y CH, resultan las variables de mayor peso sobre la primera componente, mientras que los pH subsuperficiales (pH20 y pH40) son las de menor influencia y con sentido contrario a las restantes. El contenido salino subsuperficial (CE20, CE40) y la respiración (Res) presentaron un escaso peso sobre la primera componente.

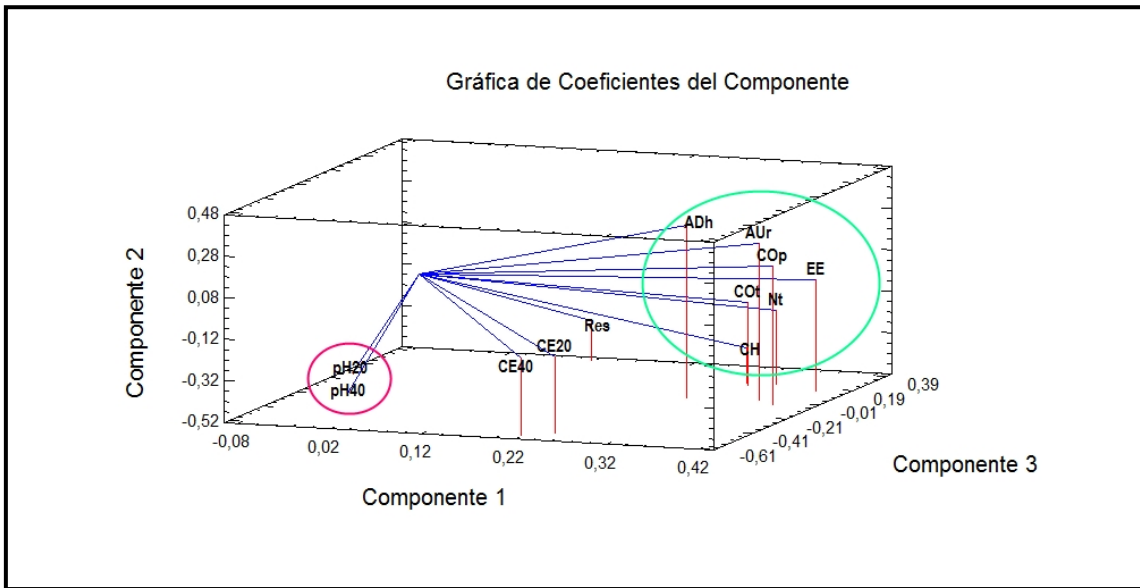


Figura 34. Coeficientes de las variables en cada componente (12 variables)

Con el objetivo de establecer una metodología, lo más objetiva posible en la selección de las variables, se fijó para la misma, un límite inferior de 5 % de peso sobre la primera componente. En sentido estricto el peso de las variables resulta ser el cuadrado de sus coeficientes. En la Tabla 30 se presentan los pesos de las variables en las dos primeras componentes y se resaltan los valores inferiores a 0,05 (5 %) sobre la componente 1. A partir de estos valores se descartaron: pH20, pH40 y Res.

Analizando los pesos de las variables sobre la primera componente se destacan los valores de EE y COp que en conjunto representan el 31 % de la varianza en esa componente. Sumando el peso correspondiente a la actividad enzimática de la ureasa, se explica el 45 % de la misma. En sentido contrario resultaron de interés los pesos correspondientes a CE20 y CE40. Si bien ingresaron dentro del límite establecido sus valores fueron bajos en la primera componente y por debajo del 0,05 en la segunda componente.

Tabla 30. Coeficientes y pesos de las variables en las dos primeras Componentes (ACP con 12 variables).

Variable	Componente			
	Coeficiente de la variable		Peso de la variable	
	1	2	1	2
COt	0,33	-0,11	0,11	0,01
COp	0,39	0,15	0,15	0,02
Nt	0,35	-0,16	0,12	0,03
EE	0,40	0,02	0,16	0,00
Res	0,12	-0,32	0,01	0,10
ADh	0,29	0,31	0,09	0,10
AUr	0,37	0,24	0,14	0,06
CH	0,32	-0,35	0,10	0,12
pH20	-0,08	-0,50	0,01	0,25
pH40	-0,04	-0,51	0,00	0,26
CE20	0,25	-0,14	0,06	0,02
CE40	0,22	-0,15	0,05	0,02
Varianza			1	1

Un nuevo ACP con las 9 variables seleccionadas señaló tres componentes principales, explicando el 72,29 % de la varianza. Los coeficientes de las variables en el primer componente, presentan signo positivo y pesos relativamente uniformes, Figura 35; no obstante CE20 y CE40 resultan las de menor valor. Sobre el segundo componente las mismas participan en las combinaciones lineales con un signo inverso a las restantes variables, razón por la cual fueron descartadas.

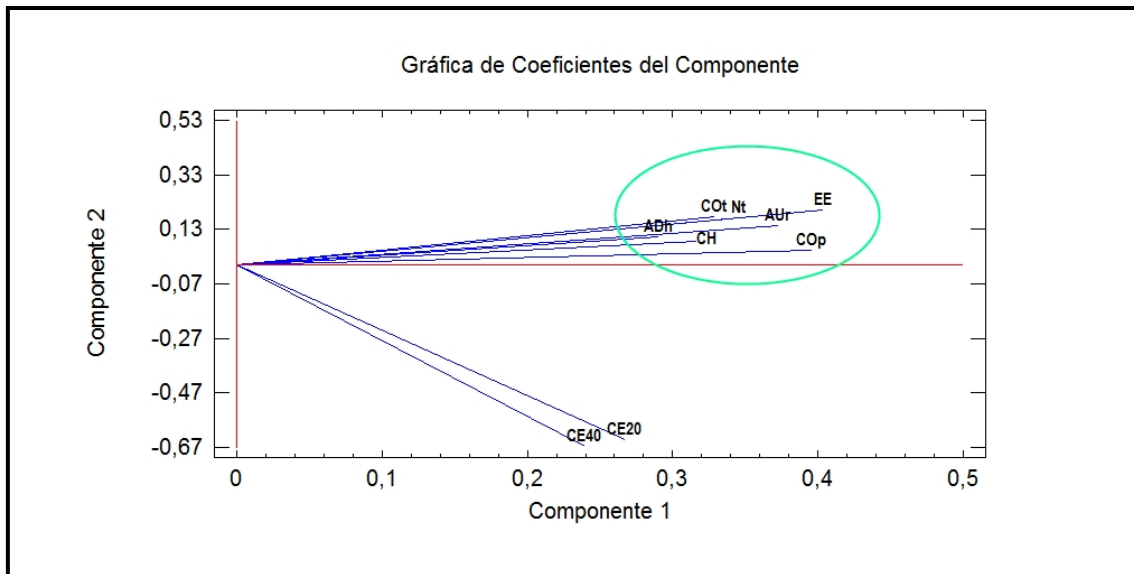


Figura 35. Coeficientes de las variables en cada componente (9 variables)

A partir de los análisis de componentes principales, se preseleccionaron: EE, COp, COt, Nt, AUr, ADh, y CH, como posibles indicadores de calidad.

III.3.2- Selección de indicadores de calidad

Los posibles indicadores identificados, se encuentran correlacionados en distinto grado, y permiten explicar mediante una única variable, creada *exprofeso* por algoritmos estadísticos (la primera componente del ACP), la mayor parte de las variaciones edáficas en el sistema evaluado. El número de indicadores para evaluar la calidad de los suelos debe ser mínimo (Cantú *et al.*, 2007), de manera que sea viable monitorear sus modificaciones. La selección final de los variables capaces de simplificar y resumir la información referente a los cambios en la calidad del suelo se basó en el análisis de las correlaciones entre las mismas y en criterios agronómicos.

En la Tabla 31 se destacan aquellas correlaciones iguales o superiores al 50 %. Se observa que en este rango COp y EE se asocian entre sí; ambas con AUr; COp con COt y EE con CH. El Nt supera este valor de correlación con COt; mientras que la ADh no lo alcanza con ninguna de las otras variables. Siguiendo este razonamiento COp y EE serían las dos primeras variables a considerar como indicadores.

Tabla 31. Correlaciones entre las variables preseleccionadas.

	COT	COp	Nt	EE	ADh	AUr	CH
COT		0,50	0,60	0,40	0,32	0,36	0,48
	1	-108	-108	-108	-108	-108	-108
		0	0	0	0,00	0,00	0
COp	0,50	1	0,42	0,59	0,46	0,68	0,42
	-108		-108	-108	-108	-108	-108
	0		0	0	0	0	0
Nt	0,60	0,42	1	0,40	0,32	0,40	0,45
	-108	-108		-108	-108	-108	-108
	0	0		0	0,00	0	0
EE	0,40	0,59	0,40	1	0,49	0,59	0,64
	-108	-108	-108		-108	-108	-108
	0	0	0		0	0	0
ADh	0,32	0,46	0,32	0,49	1	0,42	0,31
	-108	-108	-108	-108		-108	-108
	0,00	0	0,00	0		0	0,00
AUr	0,36	0,68	0,40	0,59	0,42	1	0,39
	-108	-108	-108	-108	-108		-108
	0,00	0	0	0	0		0
CH	0,48	0,42	0,45	0,64	0,31	0,39	1
	-108	-108	-108	-108	-108	-108	
	0	0	0	0	0,00	0	

La información de CH se correlacionó 64 % con la estabilidad estructural, ya seleccionada como indicador. Esto, sumado al esfuerzo operativo que requiere su determinación, ya sea a campo o incluso en laboratorio, motivó su exclusión como indicador de calidad.

Se ha mencionado que la capacidad del COT para detectar cambios en el manejo y la calidad del suelo, es inferior a la del COp. No obstante considerando que su determinación es un parámetro de uso común en todo el mundo, y que su valor se correlaciona claramente con el contenido de Nt, se incluye a COT y se excluye a Nt en el conjunto de indicadores.

La actividad enzimática de la Ureasa presentó elevada correlación con COp y EE, ambas ya incluidas como indicadores.

La actividad de la Deshidrogenasa, contrariamente a AUr, se correlaciona con todas las variables por debajo del 50 %, por lo cual de no incluirse como indicador se perdería buena parte de la información que aporta sobre los cambios edáficos analizados.

III.4- Discusión

La evaluación multivariada de los parámetros sensibles a los distintos usos de Argiudoles y Hapludoles durante 20 a 25 años, señaló a cinco variables que podríamos denominar biológicas y bioquímicas: COt, COp, Nt, (Benintende *et al.*; 2012), AUr, ADh; y a dos variables que podríamos definir como físicas: EE y CH, como posibles indicadores de calidad. Esta mayor sensibilidad de parámetros bioquímicos y físicos, con respecto a variables químicas es coincidente con lo señalado, por Loveland y Webb (2003) y Rodriguez *et al.* (2009).

En función de su participación sobre la primera componente del ACP, el diámetro medio ponderado de los agregados resistentes al agua, como una medida de la estabilidad estructural, resultó la variable de mayor peso. La sensibilidad de la estabilidad estructural, frente a distintos usos y manejos en Molisoles de otras regiones, ha sido verificada (Ferrerias *et al.*, 2007; Álvarez *et al.* 2008; Campitelli *et al.*, 2010). En Argiudoles de la zona de estudio, Baridón *et al.* (2012b) informaron cambios en la EE de agregados del horizonte superficial, luego de 20 años de uso agrícola continuo.

La fracción particulada del carbono orgánico y la actividad enzimática de la ureasa resultaron otras dos variables con gran peso en la constitución de la primera componente.

Eiza *et al.* (2005), Ferrerias *et al.* (2009) y de Figueiredo *et al.* (2010), han coincidido en señalar a la fracción particulada del CO como aquella donde se producen los mayores cambios ante diferentes manejos. Eiza *et al.* (*op. cit.*) la destacan como un indicador más eficaz que COt para la detección de los efectos sobre el suelo. De forma similar de Figueiredo *et al.* (*op. cit.*) informaron que en Oxisoles del Cerrado brasileiro, sometidos a distintos manejos, la fracción particulada del CO (>53 μm), fue la que manifestó las mayores variaciones.

Estos antecedentes, los presentes resultados y la asociación de la EE con la macro y microporosidad, el carbono orgánico y a la actividad biológica, desde el punto de vista de la generación de poros y de la humificación de la materia orgánica (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004), permitiría integrarla al conjunto de indicadores de calidad de suelos para la región.

Actualmente está aceptado que las propiedades biológicas, microbiológicas y bioquímicas son las más apropiadas para detectar cambios en la calidad del suelo, y por

lo tanto su degradación (Paz-Ferreiro and Fu, 2013). Un buen nivel de actividad microbiana es esencial para el mantenimiento de la calidad del suelo (Bástida *et al.*, 2006; Trasar Cepeda *et al.*, 2008); siendo los microorganismos la fuente principal de enzimas edáficas. Las actividades enzimáticas evaluadas se corresponden con una enzima del grupo de las oxidoreductasas, la deshidrogenasa, y una del grupo de las hidrolasas, la ureasa. Estas, a pesar de encontrarse en concentraciones relativamente bajas, cumplen un rol fundamental en la dinámica de nutrientes, en especial aquellos ligados al ciclo de la materia orgánica (Bolinder *et al.*, 1999). La ureasa es una hidrolasa relacionada con la transformación del nitrógeno orgánico a amonio, por lo cual está directamente asociada al ciclo del nitrógeno. La enzima es sintetizada y secretada extracelularmente por bacterias y hongos, pasando a formar parte de la matriz del suelo (Tripathi *et al.*, 2007). La actividad de la ureasa puede entonces estar regulada tanto por la producción y secreción de microorganismos (Aon *et al.*, 2001) como por condiciones físico químicas que incidan en la unión de la enzima a los coloides del suelo (Sinsabaugh, 1994). Dkhar *et al.* (2012), registraron cambios estacionales significativos en la actividad de esta enzima a lo largo del año; estas variaciones temporales podrían comprometer su uso como indicador de calidad de suelos. Aun cuando AUr ha resultado un parámetro sensible a distintos SPR, su utilización estaría condicionada a la realización de muestreos en una misma época del año.

La deshidrogenasa es una oxidoreductasa y como tal refleja la capacidad oxidativa total de la masa microbiana viable, pudiendo representar el tamaño y actividad de la misma. Es una endoenzima, por lo cual no está estabilizada por los coloides orgánicos e inorgánicos del suelo (Rossel *et al.*, 1997).

De lo expuesto se desprende que de las siete variables seleccionadas por su peso, sobre la variabilidad de los datos analizados, COt, COp, EE y actividad de la deshidrogenasa pueden utilizarse como indicadores de calidad ya que sintetizan parte de los cambios detectados en el sistema estudiado.

III.5- Conclusiones

El carbono orgánico total (COt), la fracción particulada del carbono orgánico (COp), la estabilidad de los agregados a la acción de agua (EE) y la actividad de la enzima deshidrogenasa (ADh) constituyen indicadores de calidad para los Argiudoles y Hapludoles evaluados.

Los indicadores de mayor peso: estabilidad estructural y carbono orgánico particulado, guardan una relación directa con el contenido y tipo de materia orgánica del suelo.

CAPÍTULO IV

SELECCIÓN DE INDICADORES PROCEDIMIENTO

IV.1- Introducción

Como se ha mencionado anteriormente el conocimiento del estado, salud o calidad del suelo, resulta una parte indispensable para la evaluación de la sustentabilidad de un agroecosistema. Numerosos estudios han examinado la mejor forma de evaluar la calidad del suelo. Si bien desde lo metodológico se plantean diferentes alternativas, por lo general existe coincidencia en que el primer paso consiste en la selección de un conjunto de indicadores de calidad apropiados, que suministren un conjunto mínimo de datos, CMD, (Andrews *et al.*, 2004).

Los antecedentes científicos citados en el presente trabajo, constituyen importantes aportes a la búsqueda, definición y comparación de indicadores de calidad de suelos. En algunos casos frente a distintos usos (Ferrerías *et al.*, 2009); en otros ante distintos manejos (Imaz *et al.*, 2010); a veces, avanzando hacia la creación de índices de calidad (Cantú *et al.*, 2007) e incluso a la utilización de estos índices para evaluar el impactos de uso (Marzaioli *et al.*, 2010). Aun existiendo diferencias en cómo determinar indicadores de calidad, es posible recopilar coincidencias en los procesos de selección; entre ellas se destaca el análisis multivariado de los posibles indicadores (Colás *et al.*, 2010; Imaz *et al.*, 2010; Campitelli *et al.*, 2010; Benintende *et al.*, 2012).

Los indicadores de calidad son herramientas válidas para definir y monitorear la calidad edáfica. Si bien está aceptado que estos no son universales (Giuffré *et al.*, 2008) y por lo tanto su estudio debe hacerse en forma particular, según las condiciones de cada agroecosistema (García *et al.*, 2012), el planteo de una secuencia metodológica para su definición resulta de interés. En regiones con escasos antecedentes edafológicos y acelerados cambios en el uso del suelo como en el área del presente estudio y en general la provincia de Formosa, concentrar esfuerzos en la determinación y monitoreo de variables edáficas específicas sería un importante avance hacia el conocimiento de la sustentabilidad de los sistemas productivos. El uso de un CMD, que constituyan indicadores de calidad, puede reducir la necesidad de determinar un gran número de parámetros para definir los procesos funcionales del suelo (Andrews y Carroll, 2001). Batista Cruz *et al.* (2004) en una revisión de trabajos y refiriéndose a México en particular, señalan que la protección del recurso suelo debe ser una política nacional e internacional. Para esto es necesario avanzar en el conocimiento de la calidad de los suelos y propiedades que resulten indicadores de la misma; estas propiedades deben acusar cambios en períodos relativamente cortos de tiempo. Para dichos investigadores

es necesario ampliar la perspectiva original, enfocada sólo en los suelos agrícolas e incluir a suelos forestales de ecosistemas naturales.

El objetivo del presente capítulo es la sistematización y discusión del procedimiento empleado para la selección de indicadores de calidad de suelos.

IV.2- Procedimiento metodológico

La síntesis del procedimiento metodológico utilizado se presenta en la Figura 36. En la misma se resumen los siguientes pasos:

IV.2.1- Definición y caracterización del área de aplicación:

Comprende la definición y caracterización del área para la cual se buscan indicadores de calidad; la misma constituirá luego el área de aplicación de los mismos. El área de estudio fue definida en forma previa a este trabajo, en base al análisis de antecedentes y trabajo de campo. Se contemplaron factores: climáticos, geomorfológicos, edáficos y sistemas productivos más frecuentes. Se decidió trabajar sobre Hapludoles y Argiudoles por constituir los suelos con mayor potencialidad productiva en la provincia (Morgan, 1980; Lanfranco *et al.*, 2009) y encontrarse actualmente afectados por un proceso de reconversión productiva. Estos Udoles se desarrollaron en los albardones de ríos y riachos, sobre impuestos a planicies aluvionales más antiguas: planicie del Río Pilcomayo, planicie del Río Bermejo, desde la región centro a la región este de la provincia.

Se trabajó en un área de aproximadamente 21.000 ha, ubicada sobre el albardón del “Riacho El Porteño”, representativas de otros albardones como los de los riachos Pilagá, Monte Lindo y Hee Hee,

IV.2.2- Identificación de puntos críticos y definición del objetivo de manejo:

En la búsqueda de indicadores de calidad de suelo, deben considerarse a aquellas propiedades edáficas sensibles a los cambios de uso del mismo, e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible (Maserá *et al.*, 1999; Astier *et al.*, 2002; Cruz *et al.*, 2004). A partir de trabajos previos en el área (Lanfranco *et al.*, 2009; Baridón *et al.*, 2012b) se identificaron como puntos críticos a: la disminución del contenido de carbono orgánico, la pérdida de estructura del suelo y el aumento de la salinidad.

En el marco de la producción agrícola, el mantenimiento de una alta calidad del suelo equivale a una elevada productividad, sin que se manifieste una degradación significativa del suelo o del ambiente (Govaerts *et al.*, 2006). Sobre la base de este concepto se fijó como objetivo de manejo a la “producción sostenible”.

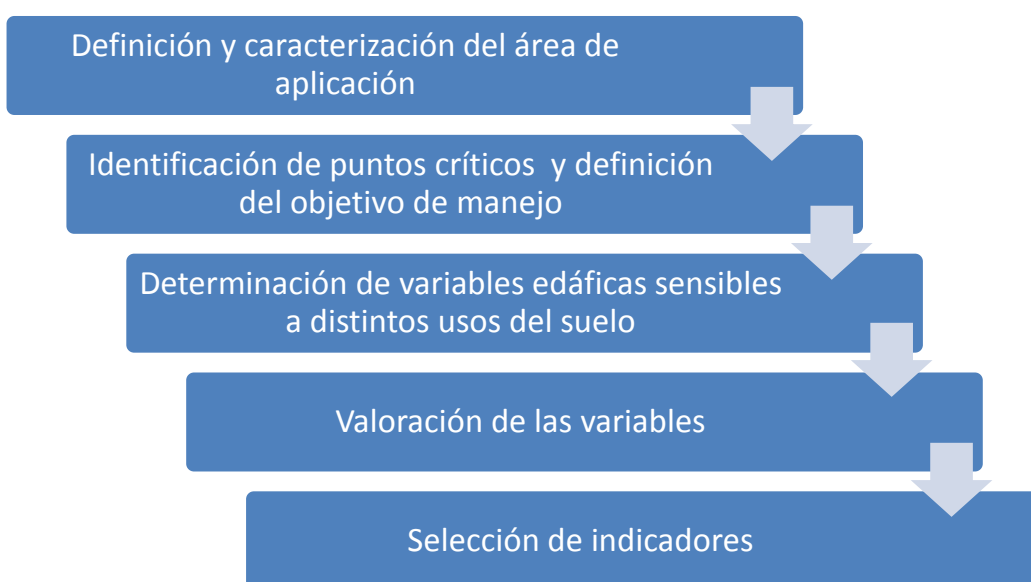


Figura 36. Esquema del desarrollo metodológico aplicado.

IV.2.3- Determinación de variables edáficas sensibles a distintos usos del suelo:

La búsqueda de indicadores de calidad, desde lo metodológico, y una vez superado el análisis de antecedentes, se inicia de distintas maneras. Algunos autores parten de la asunción de una serie de variables como “indicadores”, para luego ponerlos a prueba (Benintende *et al.*, 2012). Otros en cambio realizan alguna evaluación previa de las variables antes de considerarlas como posibles indicadores (Govaerts *et al.*, 2006; Imaz *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2012).

En forma preliminar se determinó en la medición y evaluación de 14 variables edáficas que incluyesen: variables físicas, químicas y biológicas, como así mismo que estuviesen asociadas a los puntos críticos considerados.

Los datos obtenidos fueron evaluados mediante estadística descriptiva, analizando la sensibilidad de las variables ante los distintos usos del suelo (variable independiente). Así mismo se analizó el posible efecto de las áreas de muestreo y su interacción con el uso del suelo.

IV.2.4- Valoración del peso individual de las variables:

Una vez identificadas aquellas propiedades que son sensibles a los distintos usos del suelo, resulta necesario realizar una cuantificación que permita hacer lo más objetiva posible la selección de los indicadores de calidad. Li *et al.* (2012) señalan que con el fin de obtener un CMD se han empleado muchas técnicas estadísticas, en general en el contexto multivariado, aplicando incluso lógica difusa y redes neuronales artificiales

Los suelos analizados en el área de trabajo, los usos considerados y las variables medidas, constituyen un sistema, en el cual se ha determinado su variabilidad. El peso de las variables individuales en la varianza total del mismo fue evaluado mediante análisis de componentes principales, los cuales se realizaron en dos pasos consecutivos. En el primer paso se obtuvo un CMD₁, integrado por 9 de las 12 variables que resultaron sensibles a los cambios de uso. Se utilizaron las componentes con autovalor mayor a 1 y se excluyeron como posibles indicadores, dentro del CMD₁, a aquellas variables con un peso inferior al 5% sobre la primera componente. Un nuevo análisis de componentes permitió separar un CMD₂ con 7 posibles indicadores de calidad considerando el valor y signo de los coeficientes en las dos primeras componentes.

IV.2.5- Selección de indicadores:

La selección final de los variables capaces de simplificar y resumir la información referente a los cambios en la calidad del suelo se basó en el análisis de las correlaciones entre las mismas y en criterios agronómicos que incluyeron: facilidad de la determinación del parámetro, la existencia de datos previos del mismo.

IV.3- Discusión del procedimiento.

IV.3.1- Definición y caracterización del área de aplicación:

Los métodos para la selección y evaluación de indicadores de calidad de suelos deben ser desarrollados para la región (Imaz *et al.*, 2010; García *et al.*, 2012). En tal sentido la definición y caracterización del área de aplicación resulta básica ya que establece las condiciones en que serán válidos los indicadores determinados. En capítulos anteriores se ha especificado que el área de trabajo se caracteriza, desde lo geomorfológico por conformar un albardón de materiales aluvionales, sobre impuestos a una planicie aluvional más antigua. Este albardón originado por el riacho “El porteño”, presenta

muy baja pendiente longitudinal (inferior a 0,3 %) en sentido NO-SE, hacia el Río Paraguay. En sentido transversal posee un ancho de 2 a 5 km, según la zona, y una pendiente de 0,5 a 1% en dirección N-S. Los suelos de mejor aptitud agrícola son Argiudoles y Hapludoles.

La precipitación media anual es de 1242 mm y la evapotranspiración potencial de 1300 mm anuales, lo cual clasifica a la zona de estudio como la de más alta evapotranspiración potencial dentro de la Argentina (Burgos y Vidal, 1951). La temperatura media anual es de 22-23°C; con temperaturas máximas medio-mensuales para los meses de diciembre y enero de 31-36 °C y registros de máximas absolutas de 45°C. El ingreso de masas de aire frío austral determina violentas disminuciones térmicas. El período libre de heladas se extiende entre octubre y abril, con mayor frecuencia de heladas entre los meses de mayo y agosto.

IV.3.2- Identificación de puntos críticos y definición del objetivo de manejo.

Como ya se ha mencionado, previa a toda definición de indicadores de calidad del suelo, la identificación de puntos críticos en el sistema y establecer el o los objetivos del manejo resulta prioritaria. Así, por ejemplo, Govaerts *et al.* (2006) trabajando en suelos de origen volcánico identificaron puntos críticos en base a condiciones agroecológicas imperantes y definieron como objetivo de manejo una alta productividad sin degradación significativa del medio ambiente. Imaz *et al.* (2010), en suelos semiáridos del NE de España destinados a producción cerealera, definieron como objetivo de manejo al aumento de la producción, e identificaron como puntos críticos: la conservación del agua del suelo, la actividad biológica y la estratificación de la materia orgánica.

La selección de la disminución del contenido de carbono orgánico, la pérdida de estructura del suelo y el aumento de la salinidad como puntos críticos en la zona de estudio se basó en trabajos previos en la misma. En el área, se han registrado variaciones significativas en los contenidos de carbono orgánico total, carbono orgánico particulado y estabilidad de los agregados frente a distintos usos del suelo (Baridón *et al.*, 2012b). Morgan (1980) y Lanfranco *et al.* (2011) señalan también a elevados contenidos salinos, como una problemática local de importancia. El objetivo de manejo fijado para el área, es una producción sostenible, que no conlleve a una degradación del sistema edáfico.

IV.3.3- Sensibilidad de las variables edáficas.

Autores como Benintende *et al.* (2012) predefinen como indicadores a las variables que analizan. Otros en cambio (Govaerts *et al.*, 2006; Rezaei *et al.*, 2006; Imaz *et al.*, 2010) determinan un número importante de parámetros, para realizar luego una primera evaluación del grado de significancia de los mismos con respecto a las variables independientes que se consideran. En casos donde los objetivos de manejo se encuentran asociados al mantenimiento de niveles de producción de cultivos específicos, es posible realizar una primera selección de variables en función de su correlación con los rendimientos. Tal es el caso informado por Li *et al.* (2012) evaluando la pérdida de calidad en suelos subtropicales arroceros de China. Estos investigadores realizaron un primer análisis de las variables determinando la correlación de Pearson entre las mismas y los rendimientos del cultivo. Excluyeron de los siguientes pasos a aquellos parámetros que no alcanzasen una correlación de 20 % con los rendimientos.

En la presente metodología se realizó un análisis estadístico exploratorio de las variables, el cual incluyó un ANOVA, considerando el uso del suelo al que correspondía la muestra. Sólo las variables con diferencias significativas entre los distintos usos continuaron en el proceso de análisis.

IV.3.4- Valoración del peso individual de las variables.

Al momento de evaluar el peso de las variables que resultan sensibles a los distintos usos del suelo, sistemas de productivos o en sentido amplio “manejos del suelo”, resulta imprescindible utilizar enfoques sistémicos. Los mismos se traducen en el empleo de técnicas estadísticas multivariadas, de lógica difusa y redes neuronales antes mencionadas. Distintos investigadores han utilizado análisis multivariados, en especial el análisis de componentes principales (ACP), para la selección de indicadores: Rezaei *et al.* 2006, Colás *et al.* (2010), Campitelli *et al.* (2010), Imaz *et al.* (2010), Benintende *et al.* (2012), Li *et al.* (2012), entre otros. En el presente trabajo el ACP se aplicó en forma similar a lo informado por Rezaei *et al.* (2006). Estos autores establecieron un primer CMD_1 incluyendo indicadores que superaron al 10 % de peso, sobre componentes con un autovalor superior a 1; en un segundo CMD_2 consideraron las correlaciones lineales entre indicadores. En este trabajo pH20, pH40 y Res fueron excluidas del CDM_1 , por no alcanzar el 5 % de peso sobre la primera componente. CE20

y CE40 fueron separadas posteriormente por resultar las de menor peso y poseer signo contrario a otros indicadores sobre las dos primeras componentes de un segundo ACP.

El uso de ACP y el empleo del peso de las variables sobre la primera componente, ha resultado útil tanto en la identificación de indicadores de calidad en oxisoles cubanos (Colás *et al.*, 2010), como en la selección de los indicadores de calidad para evaluar distintas prácticas de manejo en suelos semiáridos de España (Imaz *et al.*, 2010).

IV.3.5- Selección de indicadores

La selección de indicadores representativos es la clave para la evaluación de la calidad del suelo. Si bien se han publicado muchos artículos sobre la evaluación de la misma, la mayoría incluyen en el CMD variables correlacionadas, que son costosas y tediosas de relevar (Li *et al.*, 2012). En tal sentido es necesario realizar la evaluación de las correlaciones entre los indicadores preseleccionados, a fin de tratar de evitar la redundancia de información. La selección final de las variables capaces de simplificar y resumir la información referente a los cambios en la calidad del suelo se basó en el análisis de las correlaciones entre las mismas y en criterios agronómicos que incluyeron, entre otros a la facilidad en la determinación del parámetro y la existencia de datos previos del mismo. Estos conceptos ya han sido utilizados; Campitelli *et al.* (2010) señalan que los indicadores deben ser “sensibles y sencillos de medir”. En regiones del país y del mundo, que se encuentran embarcadas en un rápido proceso de desarrollo y reconversión agrícola, frutihortícola y/o ganadera, que en sentido amplio fue llamado “agriculturización”, es difícil pensar en la medición de algunos parámetros por parte de particulares.

La metodología planteada en el presente estudio avanza hasta la selección de indicadores. Una vez establecidos los mismos, deberá decidirse su forma de aplicación. Entre las posibilidades actuales tal vez la más utilizada, debido a su facilidad de uso y flexibilidad, resulte la de “índices de calidad de suelos” (Li *et al.*, 2012), existiendo ya en el país aplicaciones de los mismos (Cantú *et al.*, 2007). La creación de índices requiere ampliar la información edáfica de base e incluir valores de referencia para cada gran grupo de suelos a fin de establecer los niveles críticos de los indicadores (Cantú *et al.*, 2007; Benintende *et al.*, 2012). Así mismo estandarizar los métodos de análisis para algunos indicadores, como por ejemplos los referidos a actividad enzimática (Paz-Ferreiro and Fu, 2013).

IV.4- Conclusiones

La metodología desarrollada para identificar indicadores de calidad de suelos es sistemática y comprende procedimientos fundados en numerosos antecedentes. En el área subtropical norte de la provincia de Formosa constituye un avance hacia la identificación objetiva de indicadores de calidad. Aun cuando está desarrollada en particular para un área y suelos determinados, la misma es fácilmente repetible y podría utilizarse en otras regiones.

CAPÍTULO V

SÍNTESIS Y DISCUSIÓN GENERAL

V.1- Síntesis de resultados obtenidos

Está ampliamente aceptado que los suelos constituyen sistemas dinámicos y abiertos, en los cuales se producen intercambios de materia y energía con su entorno. Estos sistemas mutan, evolucionan o se degradan en función de las interacciones entre sus factores formadores: material original, clima, topografía, organismos y tiempo (Jenny, 1941).

En regiones como la de estudio donde estos factores son particularmente dinámicos resulta indispensable la evaluación y monitoreo de la calidad del suelo.

Como se mencionó anteriormente los suelos evaluados desarrollaron a partir de materiales sedimentarios de composición granulométrica y mineralógica variada. Si bien el proceso sedimentario en el cono aluvial del río Pilcomayo aún se encuentra activo, el cauce del mismo ha tenido un retroceso y avulsión generalizada, al haber colmatado el estero Patiño (II.2.1). Esto determinó en el albardón del riacho Porteño cierta estabilidad sedimentológica, ya que la carga de sólidos en suspensión de sus aguas, según datos propios oscila entre 20 y 50 mg.l⁻¹. No obstante debido a la topografía compleja del albardón, las precipitaciones y a la actividad antrópica esta estabilidad resulta relativa. La topografía del albardón incluye una costa actual, influenciada por la concentración salina de las aguas del riacho que en estiaje superan los 4 dS.m⁻¹; antiguos meandros total o parcialmente colmatados, paleocauces con materiales de texturas más gruesas y bajos, lagunas y esteros intercalados (II.3.1). Los Argiudoles y Hapludoles analizados ocupan los planos medios y altos de este paisaje; en su estado natural han sustentado un bosque clímax con un estrato medio (10 metros) y alto (14 m) respectivamente. En ambos suelos se individualizaron concentraciones salinas y rasgos hidrohalomórficos en profundidad que podrían asociados a flujos de agua subterráneos locales y/o regionales (II.3.1). Estos suelos difieren así de sus pares taxonómicos, desarrollados a partir de sedimentos loésicos y bajo vegetación de pradera en Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. En tal sentido interpretarlos y utilizarlos en forma análoga, por ejemplo en cuanto a labranzas y eventuales riegos complementarios, podría originar degradaciones difíciles de revertir. En este sentido los resultados del presente trabajo constituyen un avance en el conocimiento de características, comportamiento ante distintos usos e indicadores de calidad de Hapludoles y Argiudoles de la región subtropical norte de la provincia de Formosa, Argentina.

Partiendo de una situación testigo de monte nativo, los distintos sistemas productivos considerados en esta tesis: praderas, uso frutícola y agricultura continua, causaron luego de 20 a 25 años modificaciones estadísticamente significativas en todos los parámetros edáficos relevados; a excepción de la CE en la capa superficial. Si bien se registraron variaciones en el pH en los primeros 10 cm de suelo, estas no resultaron sensibles desde un punto de vista agronómico.

Entre los efectos de los de los sistemas productivos, la agricultura continua originó disminuciones de 30,75 % de COt, 72,3 % de COp, 62,44% de EE y 59,17 % de ADh. El sistema fruticultura provocó un descenso de 17,3 % en COt, 48,7 % de COp, 46,7% de EE y 47,1 % de ADh. El sistema pasturas resultó el más compatible con un sistema productivo sustentable desde el punto de vista edáfico. Los sistemas de agricultura continua y frutícolas plurianuales deberían realizar cambios en el manejo como por ejemplo el reemplazo de la labranza convencional por sistemas de labranzas conservacionistas, la incorporación de esquemas de rotación de cultivos, incluyendo ciclos de pasturas y la implementación de coberturas de pradera en las plantaciones de pomelo y banana. El sistema pradera permitiría atenuar e incluso revertir algunos de los efectos negativos de los restantes sistemas. El uso P, en forma continua durante 25 años ha incrementado el contenido de COt en 24,7 % y aumentado el diámetro medio ponderado de los agregados (parámetro utilizado para evaluar estabilidad estructural) en 12,7% con respecto al monte nativo (Mn). Sin embargo por si mismo no podría compensar la disminución de COp y ADh, ya que incluso el uso P disminuyó en 20,2 % su COp y en 32,5 % la actividad de la deshidrogenasa con respecto a Mn.

La aplicación de técnicas de análisis multivariado permitió determinar el peso relativo de las 12 variables; 8 superficiales (COt, COp; Nt; EE; CH; Res.; ADh; AUr.) y cuatro subsuperficiales (pH₂₀; CE₂₀; pH₄₀; CE₄₀). Los mayores pesos mostraron la relevancia de parámetros físicos: EE= 16 % y CH=10%, y bioquímicos: COp=15%; AUr= 14 %; Nt= 12 % COt= 11%; todos ellos asociados a la fracción orgánica. Una vez establecida la importancia de estas variables sobre el sistema y considerando sus correlaciones: COt, COp, EE y actividad de la deshidrogenasa fueron seleccionados como indicadores de calidad por sintetizar parcialmente las modificaciones edáficas que los agroecosistemas considerados han producido sobre los suelos.

V.2- Discusión

La “habilitación” de Hapludoles y Argiudoles para actividades agrícola-ganaderas, en la zona subtropical norte Formosa se inició, y en algunos casos aún se inicia, con la tala rasa del monte nativo. El destocoado mecánico y manual, apilado en costaneras y quema de rastrojos forestales (en realidad solo se aprovechan algunos árboles maderables con buen valor económico) son los pasos siguientes. Para finalizar se continúan con pasadas de rastra pesada, rastra liviana y posterior siembra, dando así origen al proceso de “agriculturización” en la región. Este proceso, ya definido, abarca también las conversiones de sistemas pastoriles a agrícolas y/o frutícolas y cambios tecnológicos que actualmente incluyen utilización de fertilizantes, herbicidas, cambio de materiales genéticos y riego, entre otros.

En el presente trabajo se han analizado algunos de los cambios ocurridos en los suelos con mayor potencialidad productiva del área: Hapludoles y Argiudoles luego de 25 años de aplicar distintos sistemas productivos. La cobertura natural de estos suelos es un monte nativo; actualmente con distintos grados de degradación por pastoreo y entresaca de maderas. Montes con escasos signos de alteración fueron tomados como testigos de un ecosistema donde los Hapludoles y Argiudoles constituyen lo que Casas y Puentes (2009) denominan “suelos de sombra”. Este concepto resulta de vital importancia para comprender la fragilidad de estos suelos y la necesidad de ocuparnos prontamente de su calidad o “salud”. Sedimentos fluviales con más del 50 % de limo, evolucionaron a los suelos de estudio, en condiciones climáticas intensas, con precipitaciones superiores a los 1200 mm anuales y de distribución estacional, evapotranspiración de 1300 mm al año, amplitudes térmicas de 50°C, y alternancia de períodos secos y húmedos entre otros. Todo esto bajo la protección de un bosque nativo formado por distintos estratos, que amortiguan el efecto de los distintos factores sobre el suelo. Este aislamiento del suelo se completa con una capa superficial de hojarasca o “broza” con un espesor que varía entre 2 a 4 cm. Esta capa desaparece casi instantáneamente junto al bosque, por lo cual no ha sido incluida en el trabajo y en todos los muestreos superficiales del monte se ha retirado previamente.

Durante los 20 a 25 años posteriores al desmonte estos suelos se han manejado y comportado como “suelos de sol” (Casas y Puentes, *op. cit*) sometidos a prácticas de manejo de la región de pampa húmeda

La identificación parámetros edáficos que sean capaces de sintetizar donde radican los principales problemas de esta transformación de suelos de sombra a sol, es fundamental para detener y revertir los procesos de degradación de suelos. Como se ha demostrado en el área subtropical norte de Formosa, estos parámetros son de índole física y bioquímica. Aun podría simplificarse más el concepto, señalando que los mismos están determinados por el contenido, composición y dinámica de la materia orgánica y el efecto de la misma sobre la estabilidad de la estructura y el sistema poroso del suelo. Así, la disminución del contenido de COp y la actividad de la deshidrogenasa en este caso, sean tal vez los indicadores más tempranos de calidad, seguidos de una variación en el COt y finalmente de la pérdida de estabilidad estructural. Los “suelos de sombra” con altos contenidos de limo son ahora transformados en “suelos de sol” y en sistemas de AC frecuentemente en suelos desnudos. En esta situación y ante precipitaciones intensas sufren el planchado, encostramiento (debido a una formación laminar) y posterior colapso y sellado del sistema poroso en su capa más superficial (Cerdà, 2000). Incluso con escasa pendiente esto conduce a la erosión hídrica. Contrariamente la vegetación del bosque original utiliza exhaustivamente la precipitación, reduce la recarga de la napa freática y colabora en el mantenimiento de niveles freáticos más profundos (Jobbágy *et al.*, 2008)

La transformación de Hapludoles y Argiudoles desarrollados bajo montes en “suelos de sol”, en la zona de estudio es sin duda difícil de revertir. Sin embargo la medición y monitoreo de los parámetros aquí informados como indicadores, permitirá conocer las variaciones en su salud o calidad y fijar así las pautas y estrategias de manejo más adecuadas.

V.3- Conclusiones generales

Casi la totalidad de las variables edáficas analizadas presentaron modificaciones en sus valores característicos. Las excepciones fueron la reacción del horizonte superficial del suelo y su contenido salino, lo cual confirma la hipótesis de nulidad con respecto a las mismas.

De los tres usos del suelo, comparados con el monte nativo, el uso pastoril resultó el más compatible con un sistema productivo sustentable desde el punto de vista edáfico. Los actuales sistemas de agricultura continua y fruticultura deben realizar modificaciones de manejo ya que conducen a una degradación del suelo.

Carbono orgánico total (COt) , la fracción particulada del carbono orgánico (COp), la estabilidad de los agregados a la acción de agua (EE) y la actividad de la enzima deshidrogenasa (ADh) constituyen indicadores de calidad para los Argiudoles y Hapludoles evaluados. Dentro de ellos, los de mayor peso, carbono orgánico particulado y estabilidad estructural, guardan una relación directa con el contenido y tipo de materia orgánica del suelo.

La metodología desarrollada constituye un avance hacia la identificación objetiva de indicadores de calidad de suelos, ya que es sistemática, está fundada en numerosos antecedentes y resultaría reproducible para otros suelos y situaciones.

La Plata, 11 de Agosto de 2015.

Doctorando: Ing. Ftal Juan Esteban Baridón

Director: Ing. Agr. Ms. Sc. Roberto Raul Casas

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta Martínez, V.; M. Mikha & M Vigil. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat-fallow for the Central Great Plains. *App. Soil Ecol.*, 37: 41-52
2. Adámoli, J.; S. Tonella y R. Ginzburg. 2004. Diagnóstico Ambiental del Chaco Argentino. Dirección de Conservación del Suelo y Lucha contra la Desertificación. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 105 pp. www.ambiente.gov.ar/archivos/web/chaco/file/diagnostico_ambiental_expeditivo.pdf; (con acceso el 02-05-2009).
3. Albanesi, A.; A. Anríquez y A. Polo Sánchez. 2001. Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del nitrógeno en una toposecuencia de la región chaqueña, Argentina. *Agriscientia*, Vol. XVIII: 3-11.
4. Albanesi, A.; A. Anríquez y A. Polo Sánchez. 2003. Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del carbono en una toposecuencia de la región chaqueña, Argentina. *Agriscientia*, Vol. XX: 9-17.
5. Álvarez, M.F.; M. Osterrieth; V. Laborde & L. Montti. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de Argiudoles Típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *CI. Suelo (Argentina)*, 26(2): 115-129.
6. Andrews, S.S., Carroll, C.R., 2001. Designing a decision tool for sustainable agroecosystem management: soil quality assessment of a poultry litter management case study. *Ecological Applications*, 11 (6), 1573–1585
7. Andrews, S.S.; D.L. Karlen and C.A. Cambardella. 2004. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 1945-1962.
8. Aon, M.A.; M.N. Cabello; D.E. Sarena; A.C. Colaneri; M.G. Franco; J.L. Burgos & S. Cortassa. 2001. I Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. *Appl. Soil Ecol.*, 18: 239-254
9. Aon, M.A. & A.C. Colaneri. 2001. II Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Appl. Soil Ecol.*, 18: 255-270

10. Astier, C.M.; M. Mass-Moreno y B.J. Etchevers,. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelo en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
11. Baridón, E.; A. Pellegrini; J. Lanfranco y V. Cattani. 2012a. Variación de la fracción orgánica por agriculturización en Alfisoles subtropicales de Argentina. *CienciAgro, Journal de Ciencia y Tecnología Agraria*, 2 (3): 371-378
12. Baridón E.; V. Merani; V. Cattani. 2012b. Modificaciones en el carbono orgánico y la estabilidad estructural asociadas al uso del suelo en una zona subtropical de Argentina. *Ciencia*, 7 (25): 7-15.
13. Bástida, F; J.L. Moreno; T. Hernández & C. García. 2006. Microbiological degradation index of soils in semiarid climate. *Soil Biol. Biochem.*, 38: 3463-3473
14. Benintende, S.; M. Benintende; D. David; M. Sterren y M. Saluzzio. 2012. Caracterización de indicadores biológicos y bioquímicos en Alfisoles, Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. *CI. Suelo (Argentina)*, 30 (1): 23-29.
15. Black, H.; P. Bellamy; R. Creamer; D. Elston; B. Emmett; Z. Frogbrook; G. Hudson; C. Jordan; M. Lark; A. Lilly; B. Marchant; S. Plum; J. Potts; B. Reynolds; R. Thompson and P. Booth. 2008. Design and operation of a UK soil monitoring network. *Science Report-SC 060073*. Published by Environment Agency. UK. ISBN: 978-1-84432-936-6. 218 pp
16. Bolinder, M.A.; D.A. Angers; E.G. Gregorich & M.R. Carter. 1999. The response of soil quality indicators to conservation management. *Can. J. Soil Sci.*, 79: 37-45
17. Brogan J.; M. Crowe; G. Carty. 2002. Developing a soil protection strategy for Ireland. Environmental Protection Agency. Ireland. ISBN: 1-84095-092-7. 56 pp
18. Burgos, J.J. y A.L. Vidal 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Meteoros*, 1(1): 3-32.
19. Campitelli, P.; A. Aoki; O. Gudelj; A. Rubenacker y R. Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *CI. Suelo (Argentina)*, 28 (2): 223-231.
20. Cantú, M.P.; A. Becker y J.C. Bedano. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *CI. Suelo (Argentina)*, 25 (2): 173-178.

21. Casas, R. y M.I. Puentes. 2009. Expansión de la frontera agrícola en la región Chaqueña: impacto sobre la salud de los suelos. p 247-270. En “El Chaco sin bosques: La Pampa o el desierto del futuro”. Editores: Jorge Morello y Andrea Rodríguez; 2009. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, Argentina. 432 p.
22. Casermeiro, J.; A. De Petre; E. Spahn y R. Valenti. 2001. Efectos del desmonte sobre la vegetación y el suelo. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.*, 10 (2): 233-244.
23. Cerdà A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil & Tillage Research* 57 (2000): 159-166
24. Colás Sánchez A., Cairo Cairo P., Machado de Armas J., Ruiz González Y., Torres Artilles P. 2010. Selección de Indicadores de calidad de un suelo ferralítico rojo (Oxisol), de la región central de Cuba. *Centro Agrícola*, 37 (3): 73-82.
25. Comisión de Agricultura y Ganadería. Cámara de Diputados de la Nación. Orden del Día N° 96. Sesiones Ordinarias 2008. Impreso el 17 de Abril de 2008. Imprenta del Congreso de la Nación. 3 p.
26. Cosentino, D.J.; M.E. Conti, y L. Giuffré. 2007. Forty years of soil degradation in Vertic Argiudolls in Entre Ríos province, Argentina. *CI. Suelo (Argentina)*, 25 (2): 133-138.
27. Cruz Bautista A.; J. Etchevers Barra; R.F. del Castillo y C. Gutierrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2): 90-97. .
28. Cruz-Ruiz E.; A. Cruz-Ruiz; L. Aguilera-Gómez; H. Norman-Mondragón; R. Velázquez; G. Nava-Bernal; L. Dendooven y B. Reyes-Reyes. 2012. Efecto en las características edáficas de un bosque templado, por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 30 (2): 189-197.
29. Dalurzo, M.; D. Toledo y S. Vázquez. 2005. Estimación de parámetros químicos y biológicos en Oxisoles con uso citrícola. *CI. Suelo (Argentina)*, 23 (2):159-165.
30. Departamento Hidrología. Dirección de Recursos Hídricos. Ministerio de Asuntos Agropecuarios y Recursos Naturales. Provincia de Formosa. 1985. “Los Recursos Hídricos de la Provincia de Formosa”. Tomo II. Sistema Porteño: Características y datos hidrológicos. 43 p.

31. de Figueiredo, C.C.; D.V. Siqueira Resck & M.A. Carbone Carneiro. 2010. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 34: 907-916.
32. Díaz, B.; P. Cairo; O. Rodriguez; I. Abreu; P. Torres; R. Jimenez; A. Dávila y A. Colás. 2005. Evaluación de la sostenibilidad del manejo del suelo pardo con carbonato (Inceptisol) a través de indicadores de calidad del mismo. *Centro Agrícola*, 32 (2): 73-78.
33. Dkhar, M.; M. S. Dkhar; H. Tynsong. 2012. Microbial activities and nutrients dynamics in sacred forest of Meghalaya. *Indian J. Innovations Dev.*, 1 (3): 175-185.
34. Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. pp. 25-37. In Doran J.W. y Jones A.J. (ed.) *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publication N° 49 (401). Wisconsin.
35. Doran, W.J.; B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. In: Doran, J.W.; D.C. Coleman; Bezdicek, D.F.; and Stewart, Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA. Special Publication Number 35. Madison, Wisconsin, pp 3-21
36. Duhour A.; Costa C.; Momo F.; Falco L.; Malacalza L. 2009. Responce of earthworm communities to soil disturbance: Fractal dimensión of soil and species' rank-abundance curves. *Applied Soil Ecology*, 43: 83-88. DOI: 10.1016/j.apsoil.2009.06.004
37. Eiza, M.; N. Fioriti; G. Studdert y H. Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *CI. Suelo (Argentina)*, 23 (1): 59-67..
38. Espinosa, Y. 2004. Calidad de la materia orgánica bajo diferentes prácticas de manejo en un suelo ácido tropical. *Rev. Fac. Agron. (Venezuela)*, 21 (2): 126-141.
39. Ferreras, L.; 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. *CI. Suelo (Argentina)*, 25(2): 159-172.
40. Ferreras, L.; 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. *CI. Suelo (Argentina)*, 27 (1): 103-114.

41. Galantini, J.A. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Tecnologías en análisis de suelos. L. Marbán y S.E. Ratto. (Eds.). 95-106.
42. García C.; F. Gil; T. Hernández; C. Trasar. 2003. Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos: Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Mundi-Prensa, 372 pp.
43. García Orenes, F., Guerrero, C., Roldán, A., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Zornoza, R., Bárcenas, G., Caravaca. F. 2010. Soil microbial biomass and activity under different agricultural management systems in a semiarid Mediterranean agroecosystem. *Soil and Tillage Research*. 109 (2): 110-115. DOI: 10.1016/j.still.2010.05.005
44. García, Y.; W. Ramírez; S. Sánchez. 2012. Indicadores de calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35 (2): 125-138.
45. Giuffré, L. ; R. Romaniuk ; M.E. Conti and N. Bartoloni.2006. Multivariate evaluation of no-tillage system quality indicators in Argiudolls of Rolling Pampa (Argentina). *Biology and Fertility of Soils*, 42: 556-560.
46. Giuffré, L.; S. Ratto y R. Romaniuk. 2008. Indicadores Ambientales. En : *Agrosistemas : Impacto Ambiental y Sustentabilidad*. Lidia Giffre, Editora. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, pp 1-17.
47. Gómez, Y.; J. Paolini y R.M. Hernández. 2008. Sustitución de la sabana nativa con plantaciones de *Pinus Caribaea (Pinaceae)* en Venezuela: efecto sobre parámetros indicadores de cambios en el carbono del suelo. *Rev. Biol. Trop.*, 56 (4): 2041-2053
48. Goodland, R. y H. Daly. 1996. Environmental sustainability: universal and non-negotiable. *Ecological Applications*, 6: 1002-1017.
49. Govaerts B.; K. Sayre; J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research* 87: 163–174. DOI:10.1016/j.still.2005.03.005
50. Hart, R.D. 1982. Conceptos Básicos sobre Agroecosistemas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 159 pp.
51. Heredia, O. S; L. Giuffré; F. Gorleri & M. Conti. 2006. Calidad de los suelos del norte de Santa Fe. Efecto de la geomorfología y el uso de la tierra. *CI. Suelo (Argentina)*, 24 (2): 109-114.

52. Heredia, S.; D. Cosentino; M. Conti. 2004. Calidad de Suelo: Intensificación de uso de la tierra y materiales coloidales en Hapludertes de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria*. 8 (1): 57-64.
53. Ideángelo, N.; M.G. Wilson y H.A. Tasi. 2007. Indicadores de calidad para dos suelos con características vérticas de Entre Ríos (Argentina). *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*. Coruña. 32: 111-125.
54. Imaz, M.J.; I. Virto; P. Bescansa; A. Enrique; O. Fernández-Ugalde; D.L. Karlen. 2010. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid mediterranean cropland. *Soil and Tillage Research*. 7(1): 17-25
55. Iriondo, M.; F. Colombo y D. Kröhling. 2000. El abanico aluvial del Pilcomayo, Chaco (Argentina-Bolivia-Paraguay): características y significado sedimentario. *Geogaceta*, 28 (2000): 79-82.
56. Iriondo, M. 2010. *Geología del Cuaternario en Argentina*. Edit. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino. 437 pp.
57. Iurrtia, C. y N. Peinemann. 1986. Efecto de la relación de adsorción de sodio y la concentración de sales sobre la conductividad hidráulica de diferentes suelos. *CI. Suelo (Argentina)*, 2: 165-177.
58. INTA. 1990. *Atlas de Suelos de la República Argentina. Provincia de Formosa. Tomo I. SAGyP.INTA. Proyecto PNUD Arg. 85/019. 1990. 641-679.*
59. Janzen, H.; C. Campbell; R. Izaurralde; B. Ellert; N. Juma; W. McGill; R. Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil & Tillage Research*, 47 (1998): 181-195.
60. Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. McGraw-Hill Editors. 281 pp
61. Jobbágy, E.; M. Noretto; C. Santoni & G. Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral*, 18: 305-322.
62. Johnson, D.E. 1998. *Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos*, Internacional Thomson Editores, Méjico. 566 pp.
63. Karlen, D.L. and D.E. Stott. 1994. Framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J.W.; D.C. Coleman; Bezdicsek, D.F.; and Stewart, *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA. Special Publication Number 35. Madison, Wisconsin, pp 53-72.

64. Karlen, D.L.; M.J. Mausbach; J.W. Doran; R.G. Cline; R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America J.*, 61: 4-10.
65. Karlen, D.L.; S.S. Andrews; B.J. Weinhold and J.W. Doran. 2003. Soil quality humankind's foundation for survival. *J. Soil Water Cons.*, 58: 171-179.
66. Khaledian, Y.; F. Kiani; D. Weindorf and S. Ebrahimi. 2013. Relationship of Potentially Labile Soil Organic Carbon with Soil Quality Indicators in Deforested Areas of Iran. *Soil Horizons*, 54 (4). DOI: 10.2136/sh13-04-0011.
67. Kristensen, H. L., G. W. McCarty, and J. J. Meisinger. 2000. Effects of soil structure disturbance on mineralization of organic soil nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 371-378.
68. Lal, R. 2000. Soil management in the developing countries. *Soil Sci.*, 165: 57-72.
69. Lanfranco, J.; A. Aragón y E. Baridón. 2009. Estudio de suelos y sustentabilidad edáfica de sistemas productivos en el Centro de Validación de Tecnología Agropecuaria Misión Tacaaglé y su área de incidencia. Informe Técnico Consejo Federal de Inversiones, CFI, Argentina. 70 pp. y anexos.
70. Lanfranco, J.; E. Baridón y A. Aragón. 2011. Manual de pautas y procedimientos para la evaluación y manejo del recurso suelo. Área subtropical norte de Formosa. 1º ed. Formosa: Prodeco 2011. ISBN 978-987-27497-0-5. 94 pp
71. Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425- 437.
72. Li P., Zhang T., Wang X., Yu D.. 2012. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil & Tillage Research*, 126 (2013): 112–118. DOI: 10.1016/j.still.2012.07.011
73. Liborio Balota, E.; M. Kanashiro; A. Colozzi Filho; D. Souza Andrade; R.P. Dick. 2004. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in Sub Tropical Agro-Ecosystems. *Brazilian Journal of Microbiology*, 35: 300-306
74. Loveland, P. y J. Webb. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil & Tillage Research*, 70 (2003): 1-18.

75. Luque, J.L. y N. Peinemann. 1995. Conductividad hidráulica en suelos vérticos del valle inferior del Río Chubut frente a la aplicación de diferentes enmiendas. *CI. Suelo (Argentina)*, 13: 70-75.
76. Manuel-Navarrete D.; G. Gallopín; M. Blanco; M. Díaz-Zorita; D. Ferraro; H. Herzer; P. Lateral; M. Murmis; G. Podestá; J. Rabinovich; E. Satorre; F. Torres; E. Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environment, Development and Sustainability* 11 (3): 621-638. DOI: 10.1007/s10668-007-9133-0
77. Marinari, S.; R. Mancinelli; E. Campiglia & S. Grego. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming system in Central Italy. *Ecol. Indicators*, 6: 701-711
78. Marzaioli R, D'Ascoli R, De Pascale R, Rutigliano F. 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 44: 205–212. DOI:10.1016/j.apsoil.2009.12.007
79. Masera, O.R.; M. Astier, y S. López Ridaura. 1999. Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales: el marco de evaluación MESMIS.GIRA. Mundi-Prensa e Instituto de Ecología-UNAM, México. 109 pp.
80. Moges A.; Dagnachew M.; Yimer F. 2013. Land Use Effects on Soil Quality Indicators: A Case Study of Abo-Wonsho Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013. DOI: 10.1155/2013/784989
81. Montenegro, C.; Strada, M.; Bono, J.; Gasparri, I.; Manghi, E.; Purmachi, G. y Brouver, M.. 2005. Estimación de la pérdida de superficie de Bosque nativo y tasa de deforestación en el Norte de Argentina. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 19 pp. www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UMSEF/File/umsef_deforestacin_congreso_afa05.pdf (con acceso el 10-05-2009)
82. Morgan, Juan G. 1980. Los suelos de la Provincia de Formosa. Ministerio de Asuntos Agropecuarios y Recursos Naturales. Provincia de Formosa, 1980. 47 pp.
83. MPyA, 2009. Ministerio de la Producción y Ambiente de la Provincia de Formosa. Consultores: Jorge Adámoli, Rubén Ginzburg, Sebastián Torrella. Programa de Ordenamiento Territorial de la Provincia de Formosa, POT-For. <http://www.formosa.gov.ar/modulos/produccion/templates/files/POT-For.pdf>; <http://www.formosa.gov.ar/modulos/produccion/templates/files/POT->

[actualizacion.pdf](#);

<http://www.formosa.gov.ar/produccion.programaordenamientoterritorial>.(con acceso el 2-05-2010)

84. NRCS (Natural Resources Conservation Service), 2002. United State Department of Agriculture (USDA). Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 2.0. September 2002. 228 pp.
85. NRCS (Servicio de Conservación de Recursos Naturales), 2010. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Claves para la Taxonomía de Suelos. Undécima Edición. 365 pp.
86. Oluwatosin, G.A.; O.D. Adeyolanu; A.O. Ogunkunle; O.J. Idowu. 2006. From land capability classification to soil quality: and assessment. Tropical and Subtropical Agroecosystems (Méjico), 6 (2): 45-55
87. Paruelo, J.M.; J.P. Guerschman y S.R. Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. CienciaHoy, Bs. As. 15 (87): 14-23
88. Paruelo, J.M.; J.P. Guerschman; G. Piñeiro; E.G. Jobbágy; S.R. Verón; G. Baldi & S. Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. Agrociencia X (2): 47-61.
89. Paz-Ferreiro J. and S. Fu. 2013. Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. Land Degradation & Development, 2013. DOI: 10.1002/ldr.2262.
90. Piccolo, G.A.; A.E. Andriulo; B. Mary 2008. Changes in Soil Organic Matter Under Different Land Management in Misiones Province (Argentina). Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), 65 (3): 290-297.
91. Piccolo, G.A.; J.A. Galantini; R.A. Rosell. 2004. Organic carbon Fractions in a yerba mate plantation on a subtropical Kandihumult of Argentina. Geoderma, 123: 333-341.
92. Ramírez Pisco R.; M.A. Taboada; R. Gil. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa las propiedades físicas de un Argiudol Típico de la pampa ondulada argentina. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín, 59 (1): 3237-3256.
93. Rezaei, S.A; R.J. Gilkes; S.S. Andrews. 2006. A minimum data for assessing soil quality in rangelands. Geoderma, 136: 229–234.

94. Rodríguez, N.; A. Florentino; D. Torres; H. Yendis y F. Zamora. 2009. Selección de indicadores de calidad de suelo en tres tipos de uso de la tierra en la planicie de Coro estado de Falcón. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 26: 340-361
95. Rossel, D.; J. Tarradelas; G. Bitton and J. Morel. 1997. Use of enzymes in soil ecotoxicology: a case for dehydrogenase and hidrolytic enzymes. In: *Soil Ecotoxicology*. J. Tarradelas, G. Bitton and D. Rossel (Eds.). Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, pp. 179-206.
96. SAGyP, Consejo Federal Agropecuario; 1995. Deterioro de las tierras en la República Argentina: alerta amarillo. SAG y P. Buenos Aires, 287 pp.
97. Sanzano, G.A.; R.D. Corbella; J.R. García y G.S. Fadda, 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo del suelo. *CI. Suelo (Argentina)*, 23 (1): 93-100.
98. Serrano Gallego, R. 2003. Análisis de datos multivariantes. En: "Introducción al análisis de datos experimentales: Tratamiento de datos en bioensayos". Edt. Universitat Jaume I. 103-144.
99. Silva, Rafael. 2008. Director de la Unidad Provincial Coordinadora del Agua (UPCA), Provincia de Formosa. Comunicación personal, Noviembre de 2008.
100. Sinsabaugh, R.L. 1994. Enzymatic analysis of microbial pattern and process. *Biol. Fertil. Soils*, 17: 69-74
101. SSSA Book Series: 5. 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Method*. Published by Soil Science Society of America, Inc American Society of Agronomy Inc. USA .1390 p.
102. Studdert, G.A.; H.E. Echeverría; E.M. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 1466-1472.
103. Toth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín geológico y minero*, 11 (4): 9-26.
104. Trasar-Cepeda, C.; M. Leiros y F. Gil-Sotres. 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperated humid zone (Galicia, NW Sapin): specific parameters. *Soil Biol. Biochem.*, 32: 747-755
105. Trasar-Cepeda, C.; M. Leiros; S. Seoane & F. Gil-Sotres. 2008. Biochemical properties of acid soils under crop rotation. *Appl. Soil Ecol.*, 39: 133-143.

106. Tripathi, S.; A. Chakraborty; A. Chakrabarti & B. Bandyopadhyay. 2007. Enzyme activities and microbial biomass in coastal soils of India. *Soil Biol. Biochem.*, 39: 2840-2848.
107. Urricariet, S.; R. Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *CI. Suelo (Argentina)*, 17 (1): 37-44.
108. Wilson, M.G.; H.A. Tasi; A. González Paz; N. Indelángelo y L.E. Díaz. 2008. Indicadores de Calidad para suelos del área de Bosques Nativos de Entre Ríos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de Mayo de 2008. Potrero de Funes, San Luis, Argentina. Libro de Resúmenes.

- AGRADECIMIENTOS

Para Adriana, Agustina y Francisco, por todo el tiempo que les he robado y prometo compensar.

A mis compañeros de Edafología, que han colaborado en los análisis de suelo y con mucha paciencia cubrieron mis clases y consultas durante los trabajos de campo.

Para todo el personal del CEDEVA Misión Tacaaglé, que me acompañó y ayudó desinteresadamente en toda la campaña formoseña. Sin su colaboración nada de esto hubiese sido posible.

A Roberto que sin conocerme aceptó dirigirme, me guió, impulsó y alentó a terminar esta tesis.

Gracias a todos.