

## INDICADORES E INDICES BIOLÓGICOS DE CALIDAD DE SUELO EN SISTEMAS FORESTALES

DIANA MARCELA TOLEDO<sup>1\*</sup>, SILVIA AMANDA ARZUAGA<sup>1</sup>,  
JUAN ALBERTO GALANTINI<sup>2</sup>, SARA VAZQUEZ<sup>1</sup>

Recibido: 06/10/2016

Recibido con revisiones: 23/04/2018

Aceptado: 03/05/2018

### RESUMEN

A comienzos del siglo XX, la selva subtropical paranaense ocupaba las dos terceras partes de la provincia de Misiones, con aproximadamente 2 millones de hectáreas. La deforestación de las tierras se produjo para el posterior uso del suelo con fines agrícola y/o forestal, particularmente para la implantación de especies exóticas como *Pinus* y *Eucaliptus*, provocando alteraciones en los suelos. El objetivo del presente trabajo fue determinar indicadores biológicos de calidad de suelo, desarrollar índices, aplicar índices funcionales de la literatura y evaluar su sensibilidad para detectar cambios en suelos rojos desmontados y forestados con *Pinus* sp. El trabajo fue realizado en Oxisoles del Departamento de Oberá (Misiones) Argentina. Se empleó un diseño completamente al azar, se consideraron dos tratamientos: Selva (S) y plantaciones de *Pinus* sp (Pi) de 20 años. Se muestrearon suelos de 12 lotes bajo cultivo de Pi y 12 bajo S. En cada uno de ellos, se extrajeron muestras compuestas de suelo de: 0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30m. Se determinaron: pH, materia orgánica total (MO) y particulada (MOP), nitrógeno total (Nt) y potencialmente mineralizable (NPM), respiración de suelo (RES). Se aplicaron los índices NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/MO, MOP/RES y NPM/RES. Las correlaciones de NPM con MO, MOP, Nt, y los índices NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/RES y NPM/RES fueron positivas y significativas en las tres profundidades. Los indicadores biológicos evaluados y sus índices, han confirmado que el uso forestal por 20 años, provocó un disturbio del equilibrio natural de los suelos vírgenes. El desmonte y posterior uso forestal produjo un balance orgánico negativo, puesto de manifiesto en la disminución de los indicadores MO (37%), MOP (41%), Nt (52%) y NPM (70%) de 0-0,10 m, y una modificación en el funcionamiento del sistema, reflejado en los índices funcionales MOP/RES y NPM/RES.

**Palabras clave:** Indicadores de calidad- Índices funcionales- Uso forestal- Suelos subtropicales.

## BIOLOGICAL INDICATORS AND INDICES OF SOIL QUALITY IN FOREST SYSTEMS

### ABSTRACT

Early in the 20th century, subtropical rainforests in Paraná used to cover two thirds of Misiones province, i.e. 2 million hectares. The land was later cleared mainly for agricultural purposes and/or forestry, particularly for plantation of exotic fast-growing trees such as *Pinus sp* and *Eucaliptus sp.*, with alterations of soils in the forestry area. The objective of this research was to determine biological indicators of soil quality, develop proper indices, apply the indices from the literatura and to assess their sensitivity in detecting changes caused by deforestation and forestry land-use in red soils. The assay was carried out in Oxisols in the department of Oberá (Misiones) Argentina. A completely randomized design was used and two treatments were included: rainforest (S) and *Pinus* sp (Pi) plantations. The soil was sampled on 12 plots under Pi and 12 under S. Composite samples were collected from each plot to 0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m depths. Total organic matter, pH, MOP, Nt, NPM and RES were determined. The following indices were calculated: NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/MO, MOP/RES and NPM/RES. The correlation of NPM with MO, MOP and Nt, as well as the NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/RES and NPM/RES indices were shown to be positive and significant across the three depth levels. The biological indicators and their indices indicated that forestry land-use over 20 years disturbed the natural balance of native soils. Land-use changes resulted in a negative organic balance, as indicated by a decrease in MO (37%), MOP (41%), Nt (52%) and NPM (70%) indicators to 0-0.10 m, and it also affected the functioning of the system, as observed in the functional indices of MOP/RES and NPM/RES.

**Key words:** quality indicators, functional indices, forest land use, subtropical soils.

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. Sargento Cabral 2131. Corrientes. Argentina. CP:3400.

<sup>2</sup> Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), CERZOS (UNS-CONICET)-Dpto. Agronomía (UNS).San Andrés 800, Bahía Blanca. Argentina.

\* Autor de contacto: marcelatoledo94@hotmail.com

## INTRODUCCION

La República Argentina cuenta con aproximadamente 1.200.000 hectáreas de bosques cultivados, que se componen principalmente por coníferas (54%), eucaliptos (32%) y salicáceas (9%). Estos bosques se concentran en la región de la Mesopotamia (Misiones, Corrientes y Entre Ríos), Delta del Río Paraná, Buenos Aires, Córdoba y Neuquén (Beale *et al.*, 2013).

En la Mesopotamia, el desmonte para habilitar tierras para cultivos, da inicio a la degradación de las tierras llegando a elevadas tasas de pérdidas por erosión hídrica. En la Provincia de Misiones, el problema se acentúa con el aumento de la ondulación del relieve y de las precipitaciones a medida que se avanza hacia el nordeste de la provincia (SAGPyA e INTA, 1990).

A comienzos del siglo XX, la selva subtropical paranaense ocupaba las dos terceras partes de la provincia de Misiones, con aproximadamente 2 millones de hectáreas. A pesar de la tala indiscriminada que se practicó durante décadas, y que implicó la pérdida de unas 500 mil hectáreas de montes naturales, Misiones continúa siendo la principal reserva de biodiversidad forestal del país (Izurieta, 2005). La tasa de deforestación anual en Misiones, es de alrededor de 1,3%, resultando en una superficie deforestada de aproximadamente 60.000 ha año<sup>-1</sup> (Del Valle *et al.*, 2011). En base al Sistema de Información Forestal de la Provincia de Misiones, la misma cuenta con 365 mil hectáreas de bosques implantados, de los cuales el 83% corresponde a *Pinus sp.* y lo restante a *Eucalyptus sp.*, *Araucaria sp.* y otras especies (Uasuf & Hilbert, 2012).

El cambio en el uso de la tierra, de bosques nativos a implantados afecta las propiedades del suelo relacionadas con su funcionalidad y productividad, provocando alteraciones en los suelos e impactando en su calidad (CS). La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo ha adoptado un concepto holístico de la CS, considerándola como la capacidad del mismo para funcionar dentro de ciertos límites naturales y antrópicos del ecosistema, sustentar la productividad vegetal y animal, mantener la calidad del agua y del aire, promover la salud de plantas, de animales y del

hombre, y soportar su habitabilidad (Larson & Pierce, 1991; Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997; De la Rosa, 2005).

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

La evaluación de indicadores de calidad bioquímicos y biológicos que describen los principales procesos metabólicos que ocurren en el suelo, pueden resultar indicadores tempranos y sensibles de los cambios ocurridos frente a distintos manejos (Marinari *et al.*, 2006; Baridón, 2015).

Benintende *et al.* (2008) evaluaron indicadores microbiológicos de suelo como carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana (CBM y NBM), nitrógeno potencial y variables bioquímicas para determinar el efecto de cuatro rotaciones en el cultivo de arroz. Posteriormente, Benintende *et al.* (2012), confirmaron la sensibilidad de estos indicadores para detectar diferencias en tres órdenes de suelos de Entre Ríos, y destacaron que el potencial de mineralización medido por incubaciones anaeróbicas presentó mayor sensibilidad que el carbono orgánico.

El potencial de mineralización de nitrógeno (NPM), es un indicador necesario para una evaluación completa de la CS (Drinkwater *et al.*, 1996; Dalurzo *et al.*, 2005), y está asociado a la calidad de la MO (Toledo *et al.*, 2013). Corresponde a la cantidad del nitrógeno orgánico edáfico que puede ser convertido por la actividad de la biomasa microbiana aerobia y heterótrofa, a formas inorgánicas solubles (fundamentalmente  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ) y que, debido a su sensibilidad a los cambios puede ser utilizado como un indicador de la capacidad del suelo para producir o como un indicador del aporte nitrogenado del suelo para apoyar recomendaciones de aplicación de N (Fabrizzi *et al.*, 2003; Galvis-Spínola & Hernández-Mendoza, 2004; Curtin & Campbell, 2006).

Universalmente el atributo de calidad que con más frecuencia se evalúa, es la materia orgánica (MO), por ser considerado un importante indicador de calidad de suelo y de sustentabilidad agroeconómica (Galantini & Suñer, 2008).

Para cuantificar la actividad del componente biótico, existen también otros parámetros de suelo, entre los que se destaca la respiración (RES). La misma hace referencia a la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como resultado de la actividad de microorganismos, raíces vivas, y macrofauna (lombrices, nematodos o insectos de suelo). El aumento de la población incrementa la producción de CO<sub>2</sub>, por lo que puede ser usado como índice de la actividad biológica como respuesta al cultivo y a las prácticas agrícolas (Doran & Jones, 1996).

La RES y el NPM son entonces importantes atributos asociados a las funciones y procesos microbiológicos del suelo al estar involucrados en la descomposición de la MO, en el secuestro de carbono, en el ciclado de nutrientes y en su disponibilidad. Dentro de la MO, la fracción > 53 μm corresponde al material orgánico más joven y activo, es la denominada materia orgánica particulada (MOP) y cumple un rol muy importante en el funcionamiento del suelo, incrementando la capacidad de almacenamiento de agua y la estabilidad de los agregados, proveyendo de sustrato de rápida descomposición a la flora y fauna del suelo y constituye un reservorio de nutrientes, principalmente de nitrógeno (Bronson *et al.*, 2004; Galantini & Suñer, 2008). Estas fracciones orgánicas lábiles son afectadas por las prácticas de manejo siendo la fracción particulada fina (53-105 μm) la más sensible (Duval *et al.*, 2015).

Arzuaga *et al.* (2016) evaluaron el efecto del reemplazo de sistemas naturales por cultivados sobre los stocks de carbono y de nitrógeno en Oxisoles, y determinaron pérdidas debidas al uso del suelo del orden del 28 y 51% respectivamente. En tanto que Ecclesia *et al.* (2015) informaron que en Misiones y en el norte de la Provincia de Corrientes el uso forestal produjo disminuciones en los contenidos de carbono orgánico y carbono orgánico particulado (COP) del 26% y 18%, respectivamente.

Dalurzo *et al.* (2005) al evaluar indicadores químicos y biológicos en suelos rojos naturales y agrícolas, encontraron a la materia orgánica particulada (MOP) y al fósforo orgánico dentro de los indicadores más sensibles; al tiempo que consideraron que el nitrógeno total (Nt), la materia orgánica (MO), y el nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM) contribuyen a identificar los cambios manifestados en las distintas profundidades y ante diferentes prácticas de manejo.

En una revisión realizada por Zornoza *et al.* (2015) sobre cuáles eran los indicadores más utilizados en el mundo bajo distintas situaciones, informaron que en sistemas bajo bosques los mayormente seleccionados fueron: carbono orgánico, pH, niveles de nutrientes, biomasa microbiana y NPM. Por otra parte, Toledo (2014) también destacó al potencial del suelo para mineralizar nitrógeno como indicador altamente sensible a los cambios en el uso en suelos subtropicales rojos y a la respiración (RES).

Existe una necesidad urgente de estudiar la calidad y la dinámica de la materia orgánica en distintos suelos tropicales (Giuffré *et al.*, 2012) en vistas de una producción sustentable. Lupi (2014), efectuó estudios sobre el impacto del manejo forestal sobre la calidad de los suelos, editando una guía técnica con pautas para el monitoreo de disturbios del suelo ocasionados por el manejo forestal.

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

Para detectar los cambios debido al uso del suelo se pueden establecer relaciones entre variables obteniendo índices funcionales (Toledo *et al.*, 2013), que pueden ser sensibles a las variaciones y estar vinculados al funcionamiento del sistema y son considerados de crucial importancia en la determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008).

Toledo *et al.* (2013), determinaron en Oxisoles índices funcionales a partir de relaciones entre variables como MO, MOP, NPM, Nt, y RES para evaluar el efecto de la eliminación de la selva y

su reemplazo por sistemas agrícolas como cultivo de Té (*Camelia sinensis*) y de Maíz (*Zea mays*).

En el presente trabajo se plantean las siguientes hipótesis:

- los parámetros biológicos resultan sensibles para detectar cambios producidos por el desmonte y posterior uso forestal.
- los índices de calidad que se desarrollaron y que resultaron sensibles en suelos bajo agricultura, podrían ser también válidos para evaluar calidad de suelos rojos en sistemas forestales.

Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar algunos parámetros biológicos de suelo y evaluar su sensibilidad como indicadores de calidad en suelos bajo bosques de *Pinus sp.*, 2) aplicar en sistemas forestales, índices funcionales de CS obtenidos para suelos rojos bajo sistemas agrícolas y 3) evaluar la sensibilidad de los índices funcionales ante situaciones de bosques implantados.

Esta información permitirá evaluar desde el punto de vista de la calidad biológica, el impacto del avance de la frontera forestal con especies exóticas como *Pinus sp.* y validar si los índices desarrollados para suelos rojos agrícolas resultan sensibles y pueden ser utilizados también para determinar los cambios producidos en suelos rojos bajo sistema forestal.

## MATERIALES Y METODOS

### Área de estudio, diseño y muestreo

El trabajo se llevó a cabo en el departamento de Oberá (27°22'S, 54°58'W), provincia de Misiones, Argentina. En base al sistema Soil Taxonomy, los suelos bajo estudio se clasificaron como: Oxisoles, en los cuales los procesos pedogenéticos **más importantes que han tenido lugar durante su evolución son:** desilificación y concentración de hierro libre y en algunos casos de gibsita junto a la desaparición casi total de los minerales fácilmente intemperizables, de los minerales arcillosos 2:1 y el lavado casi completo de los nutrientes. Presentaron un horizonte B **óxico** con material muy intemperizado, con presencia de materiales arcillosos presumiblemente caolíni-

tico o haloisítico, de baja capacidad de intercambio total ( $< 16 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) (SAGPyA e INTA, 1990; Panigatti, 2010).

La región se caracteriza por presentar clima subtropical sin estación seca marcada, temperatura media anual entre 20,5 y 21,5°C. La precipitación media anual de 1500 a 1700 mm y la evapotranspiración potencial media anual de 1050 a 1100 mm, tipo climático "Cfa" en el Sistema de clasificación climática Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007).

Se empleó un diseño completamente al azar, considerando dos tratamientos: Selva (S) y plantaciones de *Pinus sp* (Pi). Se muestrearon suelos de 12 lotes bajo cultivo de pino y 12 reservas de selva subtropical próximas a los lotes *Pinus sp*. En cada lote de S y Pi, durante los meses de otoño, se extrajeron muestras compuestas de suelo a 3 profundidades de muestreo (0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m), totalizando 72 muestras.

El tratamiento S, correspondió a reservas de selva subtropical, caracterizadas por la presencia de gran variedad de árboles de alto porte, abundancia de lianas y plantas epifitas, y sin disturbio antrópico. Con especies predominantes como: Guatambú (*Balfourodendron riedelianum*); Lapacho rosado, (*Tabebuia ipé*), Peteribí, (*Cordia trichotoma*); Timbó u oreja de negro, (*Enterolobium contortisiliquum*); Laurel, (*Nectandra lanceolata*) entre otros.

El tratamiento Pi, correspondió a lotes de *Pinus sp* de 17 a 20 años de edad pertenecientes a pequeños productores forestales con manejo convencional de la zona. Estos lotes se establecieron luego de la eliminación de la selva nativa y de la implementación de quema y de técnicas intensivas de preparación del terreno. Se aplicaron rastras de discos y de dientes en toda la superficie previa implantación del cultivo. La densidad inicial promedio de árboles fue de  $1100 \text{ ha}^{-1}$ , con raleo y poda manual, y una densidad aproximada al momento del muestreo de 300 a 330 árboles  $\text{ha}^{-1}$  y un espesor de hojarasca de pino de 0,30 m o más de espesor. Se evito muestrear los 15 primeros metros de bordura de los lotes.

La situación de selva constituyó la situación de referencia y fue utilizada para evaluar los cambios producidos por el uso forestal convencional.

## Variables evaluadas

En campaña se determinó respiración de suelo (RES), con cámaras y tubos draeger (Sarrantonio *et al.*, 1996; USDA, 1999).

En laboratorio, las muestras de suelo fueron secadas al aire, molidas y tamizadas por malla de 2 mm. Se determinó la humedad gravimétrica llevando a estufa a 105°C hasta peso constante y las siguientes variables: pH, por el método potenciométrico, relación 1:2,5 en cloruro de potasio 0,1M (Dewis & Freitas, 1970); textura por el método de Bouyoucos (Dewis & Freitas, 1970); materia orgánica (MO), por Walkley y Black modificado por Nelson & Sommers (1996); materia orgánica particulada (MOP) por modificación de fraccionamiento físico de Cambardella *et al.*, 1999, separando la MOP con un tamaño entre 53 y 2000  $\mu\text{m}$ ; nitrógeno total (Nt) por método semi-micro Kjeldahl por Bremner & Mulvaney (1982); nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM) por Waring & Bremner modificado por Keeney (1982), fósforo disponible, calcio y acidez intercambiables (Dewis y Freitas, 1970). Posteriormente, se aplicaron los índices funcionales obtenidos por Toledo *et al.* (2013) para sistemas agrícolas: MOP/MO, NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/RES y se estableció un nuevo índice: NPM/RES, todos para los primeros 0,10 m del perfil. Los datos de MO y Nt fueron publicados en Arzuaga *et al.*, 2016.

## Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante un Análisis de la Varianza (ANOVA), para las comparaciones de medias se aplicó el Test LSD ( $P \leq 0,05$ ) y para las relaciones entre las variables se efectuó un análisis de correlación de Pearson ( $P \leq 0,05$ ) utilizando el software estadístico Infostat 2015 (Di Rienzo, 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSION

Los suelos bajo estudio resultaron de reacción ácida con pH entre 4,1 y 4,5. El suelo bajo *Pinus sp.* fue más ácido aunque sin diferencias estadísticas respecto a selva ( $P > 0,05$ ). El contenido de arcilla permitió clasificarlos como arcillosos para las dos situaciones selva y plantaciones de pino, variando entre 706,2 y 754,8  $\text{g kg}^{-1}$  de suelo.

Los suelos presentaron contenidos medios de fósforo disponible y de acidez intercambiable para los primeros 0,30 m entre los siguientes rangos bajo selva: fósforo disponible (4,1 y 1,2  $\text{mg kg}^{-1}$ ), calcio (7,9 y 4,4  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), acidez intercambiable entre 0,42 y 1,43  $\text{cmolc kg}^{-1}$ , y bajo pino fósforo disponible (2,8 y 1,3  $\text{mg kg}^{-1}$ ), calcio (5,6 y 4,2  $\text{cmolc kg}^{-1}$ ), acidez intercambiable entre 2 y 1,8  $\text{cmolc kg}^{-1}$ .

## Indicadores de calidad

En la **Tabla 1**, se pueden observar los valores medios obtenidos para las distintas variables evaluadas.

La MO, variable reconocida a nivel mundial como el indicador universal de calidad, fue mayor en suelos prístinos en las tres profundidades estudiadas, con diferencias significativas respecto a los suelos bajo uso forestal. Las pérdidas de MO, bajo pino, fueron del orden del 37% en los primeros 0,10 m del perfil, y de 24 y 15 % para la segunda y tercera profundidad evaluadas respectivamente. Hernández-Hernández *et al.* (2008) determinaron en Ultisoles que el contenido de carbono orgánico disminuyó entre 55 y 85%, cuando la vegetación del bosque húmedo fue remplazada por plantaciones de Pino. La eliminación de la cubierta arbórea natural y posterior cultivo, resulta en una significativa disminución en el contenido de materia orgánica y un aumento en la susceptibilidad a la erosión hídrica (Giuffré *et al.*, 2012).

Los mayores contenidos de MOP correspondieron a Selva, con diferencias significativas en las dos primeras profundidades evaluadas. Las pérdidas de MOP por efecto del uso forestal fueron del 41 y 33 % para la primera y segunda profundidad respectivamente, mostrando que el uso forestal afectó al material orgánico más joven y activo del suelo, en coincidencia a lo hallado por Galantini *et al.* (2008) en suelos vírgenes destinados a la agricultura. En suelos bajo selva como bajo pino, los mayores valores de MO y MOP se presentaron en superficie y disminuyeron conforme la profundidad del perfil (**Tabla 1**). La MOP y su sensibilidad permiten conocer los cambios que se producen en el sistema de producción además

**Tabla 1.** Valores medios de indicadores e índices de calidad biológica en suelos bajo Selva (S) y *Pinus sp* (Pi) en las tres profundidades analizadas. N = 72.**Table 1.** Mean contents of biological index and indicators of soils under subtropical rainforest (S) and pine (Pi) for three soil depths. N = 72.

Variable	Profundidad (m)	S	Pi	CV	P<F
MO g kg <sup>-1</sup>	0-0,10	66,2A	41,2B	23	0,0001
	0,10-0,20	37,5A	28,4B	15	0,0003
	0,20-0,30	29,0A	24,7B	17	0,0317
MOP g kg <sup>-1</sup>	0-0,10	12,38A	7,48B	39	0,0053
	0,10-0,20	6,23A	4,07B	47	0,0427
	0,20-0,30	3,67A	2,99A	44	0,2815
RES kg C-CO <sub>2</sub> .ha <sup>-1</sup> . día <sup>-1</sup>	0-0,10	46,1B	67,0A	38	0,0277
	0-0,10	3,43A	1,36B	32	<0,0001
Nt g kg <sup>-1</sup>	0,10-0,20	1,95A	1,06B	26	<0,0001
	0,20-0,30	1,44A	0,88B	27	0,0003
	0-0,10	0,157A	0,047B	52	<0,0001
NPM g kg <sup>-1</sup>	0,10-0,20	0,104A	0,030B	54	0,0001
	0,20-0,30	0,053A	0,024B	40	0,0001

Materia orgánica, (MO), materia orgánica particulada (MOP), respiración (RES), nitrógeno total (Nt), nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM), e índices funcionales: NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/MO, MOP/RES, NPM/RES. Datos de MO y Nt publicados en Arzuaga *et al.*, 2016. Letras distintas para una misma profundidad indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos de acuerdo a LSD (P<0,05).

Soil organic matter (MO), particulate organic matter (MOP), respiration (RES), total nitrogen (Nt), potentially mineralizable nitrogen, and the following indices NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/MO, MOP/RES NPM/RES. Data MO and Nt published in Arzuaga *et al.*, 2016. Different letters represent significant statistical differences among treatments (P<0.05).

de predecir la disponibilidad de los nutrientes en el corto plazo (Lupi *et al.*, 2012).

Tanto en suelos forestados como en vírgenes, la RES estuvo dentro del rango considerado con una actividad de suelo ideal ya que sus valores estuvieron comprendidos entre 35,8 a 71,7 kg CO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>, considerando los rangos establecidos por la USDA, en cuanto a clases de respiración del suelo, y estado del mismo (Woods End Research, 1997 Cit. USDA, 1999). La respiración de suelo, fue mayor en suelos bajo Pino, con diferencias significativas. La caída de los contenidos orgánicos, y el aumento de la respiración de los suelos bajo forestación en un 45 %, se relacionan con el suelo desnudo luego del desmonte y su exposición a la acción de agua, a la preparación del terreno intensiva llevada a cabo antes de la implantación del bosque y durante el período inicial del crecimiento del cultivo. El método tradicional de preparación del suelo con eliminación de los residuos forestales y quema, seguido de laboreo del suelo, el control mecánico de malezas, son técnicas que favorecen la pérdida de MO y de su fracción liviana, (Lupi *et al.*, 2012) como así

también de algunos nutrientes como el N (Fernández *et al.*, 2000; Giuffrè *et al.*, 2002 Cit. Lupi *et al.*, 2012).

El mayor grosor de hojarasca bajo pino podría ser otra causa de las diferencias encontradas. Autores como Saiz *et al.* (2006) y Martín & Bostad (2009) han destacado que generalmente la respiración del suelo tiene correlaciones positivas con la masa o grosor de residuos u hojarasca del bosque.

En ambos tratamientos, los contenidos de nitrógeno total se mantuvieron dentro del rango considerado medio para suelos tropicales de América Latina (Fassbender *et al.*, 1987) y disminuyeron con la profundidad del perfil. Al igual que la MO, el Nt fue menor en suelos bajo Pino, con diferencias significativas en las tres profundidades evaluadas. En los primeros 0,10 m las pérdidas debido al uso forestal fueron del 59%, en tanto que para la segunda y tercera profundidad fue de 45 y 38 % respectivamente. El Nt del suelo está estrechamente asociado al contenido de materia orgánica, considerando que del 95 al

99% del Nt está en las fracciones orgánicas de diferente labilidad (Curtin & Weng, 1999).

En suelos bajo *Pinus sp.* las pérdidas de Nt fueron superiores a las pérdidas de MO total. Esto podría atribuirse a la estabilización físico-química del carbono orgánico con las arcillas y óxidos de hierro y aluminio (Six *et al.*, 2002).

El NPM, que representa la cantidad de N orgánico susceptible a mineralizarse, presentó los menores valores en las tres profundidades de los suelos bajo uso forestal, con diferencias significativas. En los primeros 0,20 m del perfil, los suelos forestados presentaron un 71% menos de NPM que el suelo original. Valles de la Mora *et al.* (2008) encontraron valores similares de NPM en los primeros cm del perfil en Oxisoles de México. Los menores valores de NPM concuerdan con los encontrados por Toledo *et al.* (2013) en sistemas agrícolas de Misiones en los primeros 0,10 m (pérdidas del 75 al 69%). Los suelos cultivados intensamente frecuentemente presentan baja capacidad para mineralizar N por cuanto la producción pasa a depender en gran medida a la fertilización nitrogenada (Curtin & Campbell, 2006). El NPM es un indicador relacionado a la calidad de la materia orgánica del suelo (Drinkwater *et al.*, 1996). Las diferencias encontradas se pueden atribuir a un aporte de MO más difícilmente descomponible en suelos bajo Pino, debido a la alta acidez del material orgánico aportado (acículas de pino). Los procesos microbianos son controlados por la calidad y la disponibilidad de sustrato orgánico y por las propiedades del sitio como disponibilidad de nutrientes y humedad del suelo (Jandl *et al.*, 2007). Autores como Tosin (1977) y Fernández (1987), encontraron en suelos rojos bajo *Pinus ellioti* y *P. taeda*, un aumento de la acidez, y una disminución del carbono orgánico y lo atribuyeron a la calidad de materia orgánica

aportada caracterizada por un bajo contenido en bases, que favoreció la acidificación del medio y la proliferación de hongos.

La MO, el Nt, y el NPM resultaron indicadores sensibles y útiles para detectar cambios producidos por el uso forestal para las tres profundidades bajo estudio. La RES también fue sensible a la hora de distinguir entre sistemas, en tanto que la fracción más lábil de la MO (MOP) resultó un buen indicador para las dos primeras profundidades, lo cual sumado a lo tedioso de su determinación, en este caso se recomendaría utilizar cualquiera de los anteriores aquí mencionados.

Al evaluar la relación C/N los suelos bajo situación prístina presentaron igual valor (11) en todas profundidades, denotando un equilibrio. En suelos bajo *Pinus sp.* la relación C/N fue mayor, disminuyó con la profundidad (17, 15 y 15, para primera segunda y tercera profundidad). Esta mayor relación estaría asociada a las características de los residuos de pino de alta relación C/N, altos niveles de ligninas y fenoles (Olsson *et al.*, 1996 citado por Lupi *et al.* 2014) y a la caída del N, indicando la formación de humus de baja calidad (Lupi *et al.*, 2014). Valores C/N entre 16 y 17, fueron obtenidos por distintos autores en sistemas forestales bajo diferentes especies del género *Pinus* y citados por Gallardo Lancho *et al.*, 2016.

### Índices funcionales

Para conocer los cambios en el funcionamiento del sistema bajo ambos manejos se evaluaron los índices: MOP/MO, MOP/RES, NPM/Nt, NPM/MOP y NPM/RES, los cuales fueron calculados para los primeros 0,10 m (**Tabla 2**).

**Tabla 2.** Índices biológicos obtenidos para los 0,10 m de suelo bajo los diferentes tratamientos.

**Table 2.** Biological index obtained for 0.10 m under different treatments.

Tratamiento	NPM/Nt	NPM/MOP	MOP/MO	MOP/RES	NPM/RES
Selva	0,048A	0,013A	0,19A	0,271A	0,004A
Pino	0,035A	0,008A	0,19A	0,134B	0,001B
CV	39,2	66,9	38,1	34,85	55,1
P<F	0,057	0,095	0,903	0,0001	0,0001

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ( $P < 0,05$ ).

Different letters represent significant statistical differences among treatments ( $P < 0.05$ ).

Índice MOP/MO: Esta relación es un importante indicador del aporte de carbono o de su velocidad de descomposición conforme al manejo del suelo (Galantini & Suñer, 2008). Nos indica la proporción de la fracción orgánica particulada en la materia orgánica total del suelo, y multiplicado por 100, expresa el porcentaje de MOP. El índice tomó valores medios de 0,19 para ambos tratamientos, por cuanto no mostró cambios por efecto del uso del suelo. Así para la 1ª profundidad tanto bajo Selva como Pino un 19% de la MO estaría formada por material orgánico más fácilmente descomponible, disminuyendo en ambos casos conforme aumenta la profundidad del perfil. Valores similares fueron obtenidos para suelos rojos desmontados y cultivados con maíz bajo labranza convencional por Toledo *et al.* (2013) y por Galantini & Suñer (2008) en suelos de la pampa semiárida, para sistemas Pastura-Trigo y Girasol-Trigo. Del mismo modo Píccolo *et al.* (1998) encontraron igual valor de COP/COT para suelos de Misiones bajo selva y bajo cultivo. Estos resultados estarían indicando que independientemente del uso, la proporción de MOP en el suelo se mantendría en equilibrio con la MO, y están asociados a la cantidad y calidad de los residuos orgánicos. Así cuando el índice MOP/MO, toma valores bajos las condiciones que se dan resultan muy favorables para la transformación del material orgánico que ingresa al suelo (Galantini *et al.*, 2008). La variación del índice depende de la proporción de MOP y de la calidad de la MO aportada por el cultivo (Galantini & Suñer, 2008). No obstante, en lugares donde las precipitaciones y las temperaturas son tan altas la proporción de MOP respecto a la MO se mantiene más o menos constante por la gran mineralización y entonces la dinámica de la MO es controlada por las condiciones climáticas, por cuanto sería menor el impacto de la calidad de los residuos.

Índice MOP/RES: este índice está relacionado al ciclado de la MO y a la disponibilidad de nutrientes. El índice fue menor en los suelos forestados respecto a los vírgenes, con diferencias significativas, lo cual se relaciona a la mayor tasa de respiración y al gran espesor de hojarasca acumulada en suelos bajo pino. Powers *et al.* (2018) destacan que el espesor de hojarasca de los bosques de coníferas influye en la RES, tanto directamente, a través de la contribución del flujo de CO<sub>2</sub> asociado con la descomposi-

ción de material orgánico; e indirectamente, alterando el ambiente físico dentro del espesor superficial del suelo mineral por modificación del ambiente del mismo debido a la presencia de una capa de hojarasca intacta. Bosques dominados por coníferas perennes, a menudo acumulan mayor masa y grosor hojarasca a medida que envejecen (Giesen *et al.*, 2008; Bradford & Kastendick, 2010 Cit. Powers *et al.*, 2018), lo que podría aumentar la respiración del suelo, a la vez que también puede ejercer una gran influencia indirecta en la respiración al alterar la temperatura y humedad del suelo (Borken *et al.*, 2003).

Índice NPM/RES: este índice fue tres veces menor en suelos bajo *Pinus sp.* respecto a los suelos no disturbados ( $P \leq 0,0001$ ). Esta caída del potencial para mineralizar del suelo desmontado y forestado, estaría relacionado por un lado al disturbio en sí y a la alta acidez del sitio forestal que favorecería la proliferación de hongos los cuales son menos eficientes en la mineralización del N orgánico y por otro a la calidad de la MO caracterizada por su acidez, y alto contenido en ligninas (Fernández, 1987; Berg *et al.*, 1987; Olsson *et al.*, 1996 Cit. Lupi *et al.*, 2014), por cuanto se presenta una menor mineralización del nitrógeno orgánico. La mineralización del nitrógeno orgánico depende del contenido de MO y de la relación C:N de los materiales orgánicos aportados al suelo (USDA, 2014). Los cambios en la calidad de la MO determinan alteraciones en la mineralización y en la disponibilidad de los nutrientes lo cual puede afectar la productividad de las plantaciones (Lupi *et al.*, 2012).

Índices NPM/Nt y NPM/MOP: No se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

### Relación entre variables

En la **Tabla 3** se puede observar la Matriz de Correlación de Pearson ( $P < 0,05$ ), entre el NPM y las restantes variables evaluadas, para cada profundidad.

Al evaluar las relaciones entre NPM y los restantes atributos, se obtuvo una correlación positiva y altamente significativa con la MO y el Nt, en las tres profundidades analizadas. Suelos que poseen naturalmente contenidos bajos de MO, o cuyos contenidos disminuyen por un mal manejo, ten-



**Tabla 3.** Matriz de correlación (coeficientes, probabilidades) entre nitrógeno potencialmente mineralizable y los indicadores e índices evaluados. N = 72.

**Table 3.** Correlation matrix (coefficients, probabilities) between potentially mineralizable nitrogen and indicators and index evaluated. N = 72.

	Prof. (m)	MO	MOP	Nt	NPM/Nt	NPM/MOP	MOP/RES	NPM/RES
NPM	0-0,10	0,79	0,643	0,714	0,478	0,490	0,658	0,909
	Prob. <	(4,3.10 <sup>-6</sup> )	(0,001)	(8,9.10 <sup>-5</sup> )	(1,1.10 <sup>-5</sup> )	(0,015)	(4,8.10 <sup>-4</sup> )	(8,2.10 <sup>-10</sup> )
	0,10-0,20	0,672	-0,303	0,933	0,929	0,947	-	-
	Prob. <	(3,3.10 <sup>-4</sup> )	(0,150)	(3.10 <sup>-11</sup> )	(6,2.10 <sup>-11</sup> )	(2,3.10 <sup>-12</sup> )	-	-
	0,20-0,30	0,482	-0,166	0,831	0,585	0,791	-	-
	Prob. <	(0,017)	(0,438)	(5.10 <sup>-7</sup> )	(0,003)	(4,2.10 <sup>-6</sup> )	-	-

MO (materia orgánica), nitrógeno total (Nt), materia orgánica particulada (MOP), respiración (RES), y los índices funcionales NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/MO, MOP/RES y NPM/RES.

Soil organic matter (MO), total nitrogen (Nt), particulate organic matter (MOP), respiration (RES) and the following index NPM/Nt, NPM/MOP, MOP/MO, MOP/RES y NPM/RES.

drán bajos contenidos de NPM (USDA, 2014). La correlación del NPM con la MOP resultó positiva y significativa sólo para los primeros 0,10 m. Similares correlaciones fueron halladas por Domínguez (2004) y Studdert *et al.* (2006). Las fracciones orgánicas más lábiles pueden indicar el tamaño del compartimiento fácilmente mineralizable de nutrientes, siendo de gran utilidad para el diagnóstico del potencial de mineralización de N del suelo (Curtin & Weng, 1999). Las correlaciones con los índices NPM/Nt; NPM/MOP; MOP/RES y NPM/RES fueron positivas y significativas en las tres profundidades evaluadas.

De las dos hipótesis planteadas, se acepta la primera "los parámetros biológicos resultan sensibles para detectar cambio producidos por el desmonte y posterior uso forestal". Respecto a la segunda "los índices de calidad que se desarrollaron y que resultaron sensibles en suelos bajo agricultura, podrían ser también válidos para evaluar calidad de suelos rojos en sistemas forestales" se cumple sólo para el índice MOP/RES.

## CONCLUSIONES

Luego de 20 años del reemplazo de la selva por plantaciones de *Pinus sp.* se observa una alteración del equilibrio natural, detectándose cambios en la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo y en los procesos biológicos.

De los cuatro índices que fueron desarrollados para sistemas agrícolas y aplicados en este trabajo, sólo el índice MOP/RES resultó válido para ser utilizado en Oxisoles bajo sistemas implantados con *Pinus sp.*

Los atributos MO, MOP, Nt, NPM y RES, resultaron buenos indicadores de calidad y permitieron detectar cambios producidos por el desmonte y posterior uso forestal.

Los índices funcionales NPM/RES y MOP/RES fueron sensibles a los cambios debidos al uso y confirmaron la estrecha relación entre el potencial del suelo para mineralizar nitrógeno, la calidad de los residuos orgánicos y la respiración del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. A la Ing. Agr. Stella Maris Contreras Leiva por su participación en la determinación de la textura de los suelos.

## BIBLIOGRAFIA

- Arzuaga, SA; DM Toledo; SM Contreras Leiva & S Vazquez. 2016. Stocks y relaciones de estratificación del carbono y nitrógeno en Oxisoles bajo sistemas forestales. *Ci Suelo (Argentina)* 34 (1):13-20.
- Baridón, JE. 2015. Cambios físicos, químicos y microbiológicos en suelos subtropicales de la provincia de Formosa ante el proceso de agriculturización. Un aporte al conocimiento de la calidad del suelo y sus indicadores.

- Tesis Doctoral en Ciencias Agrarias y Forestales. 106 p. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Beale, I & EC Ortiz. 2013. El sector forestal argentino: bosques implantados. Revista de Divulgación Técnica Agrícola y Agroindustrial. <http://www.agrariasvirtual.com.ar/fca/sivitec/revistas-redita/redita-revista41.pdf>. Fecha último acceso: 13/04/2018.
- Benintende, S; M Benintende; M Sterren & J De Battista. 2008. Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecological Indicators*, Vol. 8 (5):704-708.
- Benintende, S; M Benintende; D David; M Sterren & M Saluzzio. 2012. Caracterización de indicadores biológicos y bioquímicos en Alfisoles, Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. *Ci. Suelo (Argentina)* 30(1):23-29.
- Berg, Björn; H. Staaf & B Wessen. 1987. *Journal Scandinavian Journal of Forest Research* Vol. 2, 1987, Issue 1-4. Published online: 10 Dec 2008. <https://doi.org/10.1080/02827588709382478>. Fecha último acceso: 13/04/2018.
- Borken, W; EA Davidson; K Savage; J Gaudinxi & SE Trumbore. 2003. Drying and wetting effects on CO<sub>2</sub> release from organic horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1888-1896.
- Bremner, AE & CS Mulvaney. 1982. Total nitrogen. In: AL Page *et al.* (Eds). *Methods of soil analysis. Part 2.* p. 595-624. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Bronson, KF; TM Zobeck; TT Chua; V Acosta-Martinez; RS Van Pelt & JD Booker. 2004. Carbon and nitrogen pools of Southern High Plains cropland and grassland soils. *Soil Sci. Soc Am. J.* 68:1695-1704.
- Cambardella, CA; AM Gajda; JW Doran; BJ Weinhold & T Kettler. 1999. Estimation of particulate an total organic matter by weight loss-on-ignition. In: R Lal, JF Kimble & RF Follet (Eds). *Carbon methods.* CRC Press, Boca Raton, FL.
- Curtin, D & G Weng. 1999. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potencial. *Soil Sci. Soc Am. J.* 63:410-415.
- Curtin, D & CA Campbell. 2006. Mineralizable Nitrogen. Chapter 46. *New Zealand Institute for Crop and Food Research Christchurch. New Zealand Agriculture and Agri-Food Canada Ottawa, Ontario, Canada.* [http://www.niordc.ir/uploads%5C86\\_106\\_Binder4.Pdf](http://www.niordc.ir/uploads%5C86_106_Binder4.Pdf). Fecha último acceso: 02/03/2016.
- Dalurzo, HC; DM Toledo & S Vazquez. 2005. Parámetros químicos y biológicos en Oxisoles con uso citrícola. *Ci Suelo (Argentina)* 23(2):159-165.
- De la Rosa, D. 2005. Soil quality evaluation and monitoring based on land evaluation. *Land degradation & development*, 16:551-559.
- Del Valle, P; M Grulke; B Lorente & LN López. 2011. Proyecto Manejo Sostenible de los Recursos Naturales. Componente Bosques Nativos y su Biodiversidad. Informe técnico. Modelos de Producción Sostenible para la Ecorregión Selva Misionera. Informe técnico en el marco de la consultoría: Manual de Buenas Prácticas y Modelos de Producción Sostenible. 2011. UNIQUE. El Dorado, Misiones. Argentina.
- Dewis, J & F Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. *Boletín sobre suelos N° 10.* FAO. Roma. 36-57p.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2015. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>. Fecha último acceso: 13/4/2018
- Domínguez G. 2004. Materia orgánica particulada: su relación con dos sistemas de labranza y con el rendimiento de maíz en un molisol de Balcarce. Tesis de Mestría, Área de Postgrado en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agraria, UNMP, Argentina.
- Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In JW Doran; DC Coleman; DF Bezdicek, & BA Stewart (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Pp. 3-21. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Doran, JW & A Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. *SSSA Special Publ.* 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Drinkwater, LE; C Cambardella; JD Reeder & CW Rice. 1996. Potentially mineralizable nitrogen as an indicator of biologically active soil nitrogen. In: JW Doran & AJ Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality.* SSSA Special Publ. 49. Pp. 217-230. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Duval, M; JM Martinez; J Iglesias; JA Galantini & L Wall. 2015. Secuencia de cultivos y su efecto sobre las fracciones orgánicas del suelo. En: Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas de los suelos y sus efectos sobre los balances de carbono. Sa Pereira, Galantini JA & Minoldo G. Pp. 51-55. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Eclesia, RP; G Piñeiro & EG Jobbágy. 2015. Balance del carbono edáfico en forestaciones y pasturas subtropicales: análisis de los ingresos y egresos de c al suelo. En: Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas de los suelos y sus efectos sobre los balances de carbono. De Sa Pereira, Galantini J.A y Minoldo G. Pp. 62-65. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Fabrizzi, KP; A Morón & FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollic soils in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1831-1841.

- Fernández, RA. 1987. Influencia del sistema desmonte-reforestación con *Pinus. spp* sobre algunas características químicas de los suelos. *Ci Suelo*. (Argentina), 5: 123-129.
- Fernández, R; A Lupi; N Pahr; H Reis & H O' Lery. 2000. Técnicas de manejo de residuos de cosecha para el establecimiento forestal y su impacto sobre la condición química de los suelos rojos del noreste de Argentina. En: *Avances en Ingeniería Agrícola*. Pp. 243-248. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Fassbender, HW & E Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina IICA. San José. Costa Rica. 420 p.
- Galantini JA & L Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* XXV (1):41-55.
- Galantini, JA; J Iglesias; M Landriscini; L Suñer; & G Minoldo. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En: *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. JA Galantini (Ed.). Pp. 71-93. Editorial Universidad Nacional del Sur.
- Gallardo Lancho, JF. 2016. Modelización de la dinámica de la materia orgánica. Pp. 281. En: *La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono*. Gallardo Lancho JF. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Orientadora Grafica. 388 pp.
- Galvis Spínola, A & T Hernández Mendoza. 2004. Cálculo del nitrógeno potencialmente mineralizable. *Interciencia* 29(7):377-383.
- Giuffré, L; G Piccolo; R Romaniuk & J Prat. 2012. Deforestación y sistemas productivos en suelos de Misiones. <http://www.es-trucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=2876>. Fecha de último acceso: 13/4/2018
- Hernández Hernández, RM; E Ramirez; I Castro & S Cano. 2008. Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia* 42:253-266.
- Izurietta, CA. 2005. Estrategia forestal de la provincia de Misiones. Instrumentos para el diseño de políticas. Buenos Aires: Dirección Nacional de Programación Económica Regional, (DNPER). Ministerio de Economía y Producción, Argentina. <http://lanic.utexas.edu/project/etext/llilas/cpa/spring04/argbrazil/izurietta.pdf>. Fecha de último ingreso: 13/4/2018.
- Jandl, R; M Lindner; L Vesterdal; B Bauwens; R Baritz; R Dale; F Hagedorn; W Johnson; K Minkinen & KA Byrne. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Review. *Geoderma*, Volume 137, Issues 3-4, Pp. 253-268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>. Fecha de último acceso: 13/4/2018.
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RG Cline; RF Harris & GE Schuman. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Keeney, DR & RA Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. p. 643-698. In: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Page *et al.* (eds.). Agronomy monogr. N° 9. 2nd ed. ASA & SSSA, Madison, WI.
- Larson, WE & FJ Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. p. 175-203. In: *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand: International Board for Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings N°12 (2).
- Lupi, AM; ME Conti & RA Fernández. 2012. Calidad del carbono orgánico del suelo en diferentes técnicas de manejo de residuos forestales. *Ciência Florestal*, 22(2):295-303. Santa Maria, Brasil.
- Lupi, AM. 2014. Pautas para el monitoreo de disturbios del suelo ocasionados por el manejo Forestal. Instituto de suelos, CIRN-INTA. Proyectos INTA PNFOR1104073-PNSUELOS1134023. pdf. <http://inta.gob.ar/documentos/pautas-para-el-monitoreo-de-disturbios-del-suelo-ocasionados-por-el-manejo-forestal/> Fecha último acceso: 12 de abril de 2018.
- Lupi, AM; R Fernandez; R Martiarena; A Von Wallis; N Pahr & T Boca. 2014. Evolución de un suelo Subtropical con diferentes manejos de residuos forestales. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014, Buenos Aires, Argentina
- 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.
- Mariscal Sancho, I de L. 2008. Recuperación de la calidad de Ultisoles mediterráneos degradados, mediante la aplicación de enmiendas y formas alternativas de uso. Tesis Doctoral. 296 pp. Universidad Politécnica de Madrid. España. [http://oa.upm.es/1597/1/IGNACIO\\_DE\\_LOYOLA\\_MARISCAL\\_SANCHO.pdf](http://oa.upm.es/1597/1/IGNACIO_DE_LOYOLA_MARISCAL_SANCHO.pdf) Fecha último acceso: 18/12/2013.
- Martin, JG & PV Bolstad. 2009. Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape. *Soil Biol. Biochem.* 41:530-543.
- Mórtola N & A Lupi. M. 2011. Indicadores de calidad de suelo para el manejo sustentable de los agroecosistemas productivos en Argentina. VI Congreso Iberoamericano de Física y Química ambiental. 25 al 29 de abril. México. ISBN: 978 607 7533 95 5. 7 p.

- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: JM Bigham (ed). Methods of soil analysis, Part. 3. Chemical Methods. Pp. 961-493 1010. Am. Soc. Agron. & Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, WI.
- Panigatti, JL. 2010. Argentina: 200 años, 200 suelos. Ed. INTA, Buenos Aires. 345p.
- Peel, MC; BL Finlayson & TA Mc Mahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. *Earth Syst. Sci.* 11:1633-1644.
- Píccolo, GA; JA Galantini; RA Rosell & AM Miglierina. 1998. Transformaciones de la materia orgánica en un suelo laterítico (Misiones, Argentina): II. Cambios en la materia orgánica particulada y humificada. *Agricultura Técnica (Chile)*, 58(2):142-150.
- Powers, M; R Kolka; J Bradford; B Palik & M Jurgensen. 2018. Forest Floor and Mineral Soil Respiration Rates in a Northern Minnesota Red Pine Chronosequence. *Forests* 9 (1), 16. doi:10.3390/f9010016.
- Rojas, JM. 2012. Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el área piloto de la Ecorregión chaqueña. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Orientación: Producción Sustentable. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán. 152 pp.
- Romaniuk, RI. 2010. Índices de calidad de suelos: evaluación en sistemas extensivos e intensivos de producción agrícola. Tesis Doctoral de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. 133 pp.
- SAGPyA e INTA, 1990. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Proyecto PNUD ARG. 85/019. Atlas de Suelos de la República Argentina. Tomo II. 677 p.
- Saiz, G; KA Byrne; K Butterbach-Bahl; R Kiese; V Blujdea & EP Farrell. 2006. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Glob. Chang. Biol.* 12:1007-1020.
- Sarrantonio, M; JW Doran; MA Liebig & JJ Alvorson. 1996. On farm assessment of soil quality and health. P 83-105. In: JW Doran & AJ Jones (Eds). Methods for assessing soil quality. SSSA. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- Six, J; RT Conant; EA Paul & K Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 241 (2):155-176.
- Studdert, GA; N Fioriti; V Cozzoli; NV Diovisalvi & MJ Eiza. 2006. Relación entre nitrógeno anaeróbico y materia orgánica de Molisoles de Balcarce. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, septiembre de 2006. En CD.
- Toledo, DM; JA Galantini; E Ferrecio; SA Arzuaga; L Gimenez & S Vazquez. 2013. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ci Suelo (Argentina)* 31:201-212.
- Toledo, DM. 2014. Calidad de suelo en agroecosistemas de Misiones: Desarrollo y validación de índices de calidad. Su aplicación en la evaluación de los cambios en el uso de las tierras. Tesis Doctoral de la Universidad Nacional del Nordeste en el Área de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrarias. UNNE. Argentina. 164 pp.
- Tosin, JE. 1977. Influencia do *Pinus elliottii*, da *Araucaria angustifolia* e da mata native sobre microflora do solo. *Floresta* 8:73-74.
- Uasuf, A & J Hilbert. 2012. El uso de la biomasa de Origen Forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Informes Técnicos Bioenergía. Año 1 N° 3. ISSN 2250-8481. Trabajo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en el marco del proyecto internacional BABETHANOL (New feed stock and innovative transformation process for a more sustainable development and production of ligno-cellulosic ethanol).
- USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Traducción al Español del: "SoilQuality Test Kit Guide" Realizada por los investigadores: Alberto Lutens Juan Carlos Salazar Lea Plaza del: "Área de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras". Instituto de Suelos CRN-CNIA-INTA.
- USDA. 2014. Potentially Mineralizable Nitrogen (PMN). Soil Quality Indicators. USDA. Natural Resources Conservation Service. Disponible en : <http://www.nrcs.usda.gov>. Fecha de último acceso: 13/4/2018.
- Valles de la Mora, B; G Cadisch & E Castillo Gallegos. 2008. Mineralización de nitrógeno en suelos de pasturas con *Arachis pintoi*. Técnica Pecuaria en México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61346107>. Fecha de último acceso: 12/4/2018.
- Wienhold, BJ; SS Andrews & DL Karlen. 2006. Soil quality: indices and appraisal. Proc. International Conference on Soil, Water, and Environmental Quality-issues and strategies. Pp 67-72. New Delhi, India. International Symposium on Ecological Indicators and Indices.
- Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arcenegui; J Mataix-Beneyto & I Gómez. 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 2079-2087.
- Zornoza, R; JÁ Acosta; F Bastida; SG Domínguez; DM Toledo & A Faz. 2015. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *SOIL* 1:173-185. [www.soil-journal.net/1/173/2015/doi:10.5194/soil-1-173-2015](http://www.soil-journal.net/1/173/2015/doi:10.5194/soil-1-173-2015). Fecha de último acceso: 13/4/2018.